

Systèmes de Transmission

Elizabeth Colin

Systèmes de transmission

Cours – TD

Elizabeth Colin
Laboratoire AllianSTic
Bâtiment H – 4^{ème} étage
elizabeth.colin@efrei.fr

Plan du cours

- ▶ Introduction
- ▶ Composantes d'un système de transmission
- ▶ Principe de la modulation
- ▶ Modulations analogiques
 - Modulations d'amplitude
 - modulations de phase et de fréquence
- ▶ Modulations numériques
- ▶ Principales architectures d'émission / réception

Plan du cours

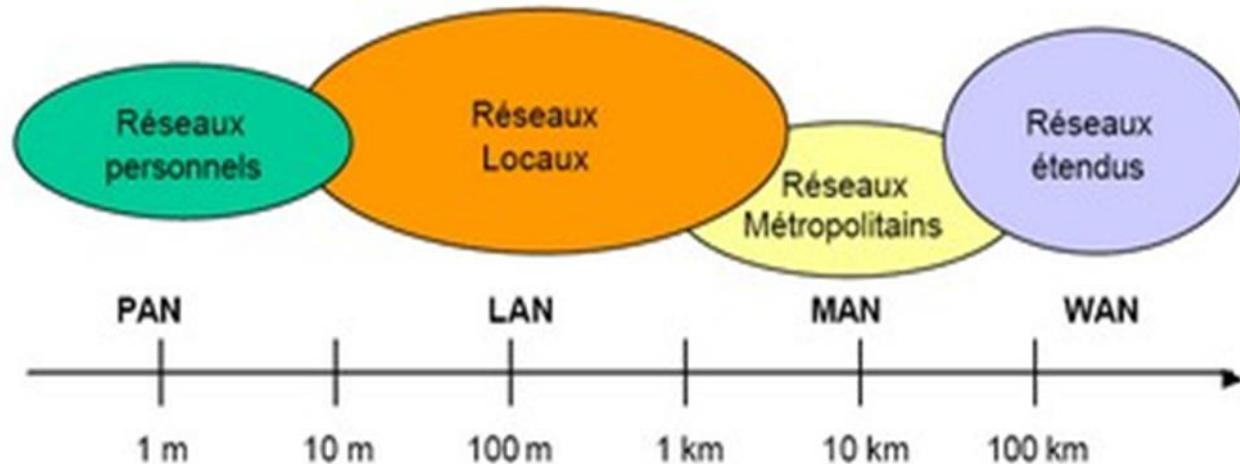
- ▶ **Introduction**
- ▶ Composantes d'un système de transmission
- ▶ Principe de la modulation
- ▶ Modulations analogiques
 - Modulations d'amplitude
 - modulations de phase et de fréquence
- ▶ Modulations numériques
- ▶ Principales architectures d'émission / réception

Introduction

- ▶ Objectifs du cours :
 - Acquérir les bases sur
 - Principes des systèmes de transmission
 - Composants des systèmes de transmission
 - Technologies et techniques de transmission
 - Architectures d'émission / transmission
 - Être capable de comprendre, comparer et choisir un système de transmission adapté à une application donnée

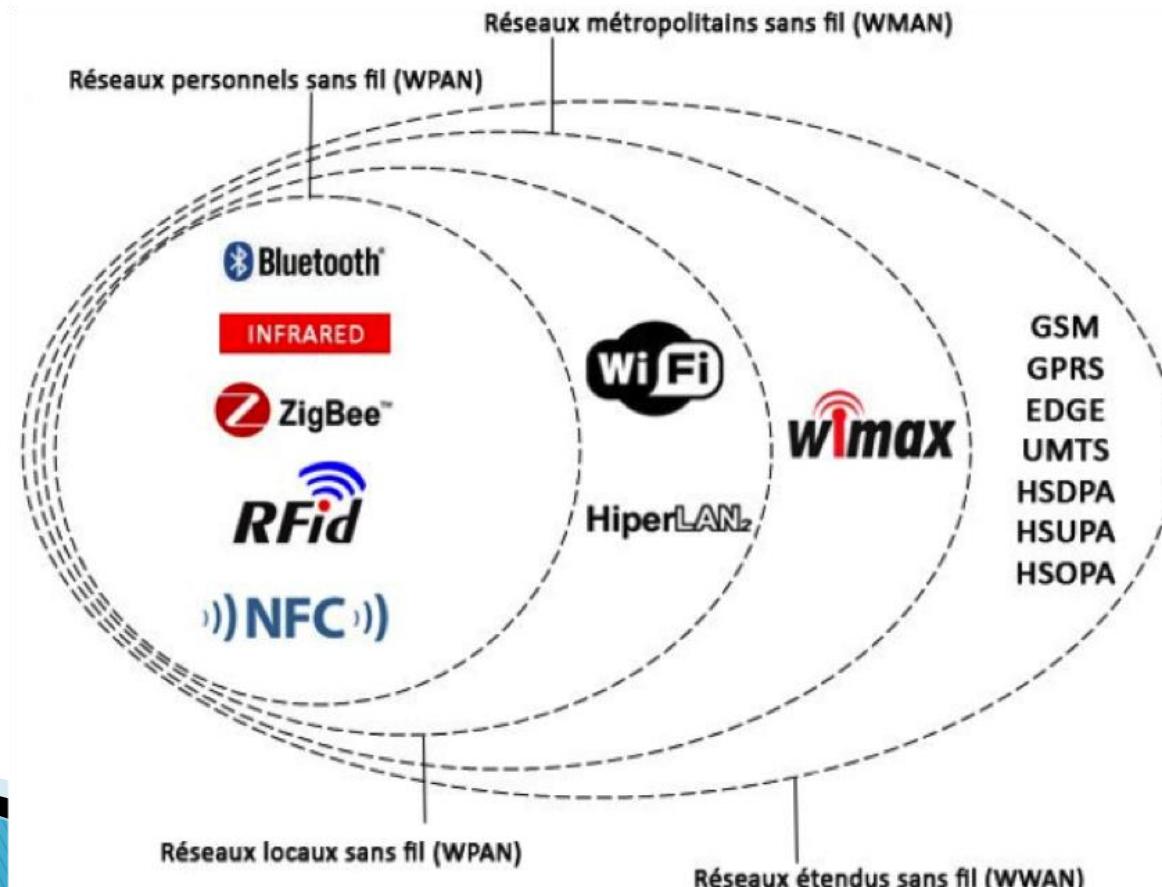
Introduction

- ▶ Systèmes de transmission pour partager l'information
 - À travers différents réseaux
 - PAN : Personal Area Network
 - LAN : Local Area Network
 - MAN : Metropolitan Area Network
 - WAN : Wide Area Network



Introduction

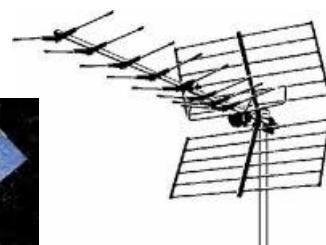
- ▶ Systèmes de transmission pour partager l'information
 - À travers différents réseaux (filaires ou sans fil)



Introduction



▶ Télécommunications classiques

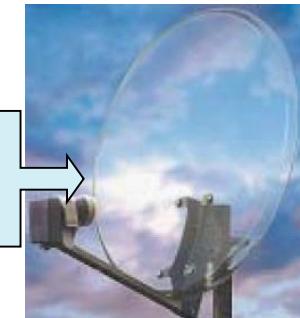


Analog 800 MHz
DECT ~1900 MHz



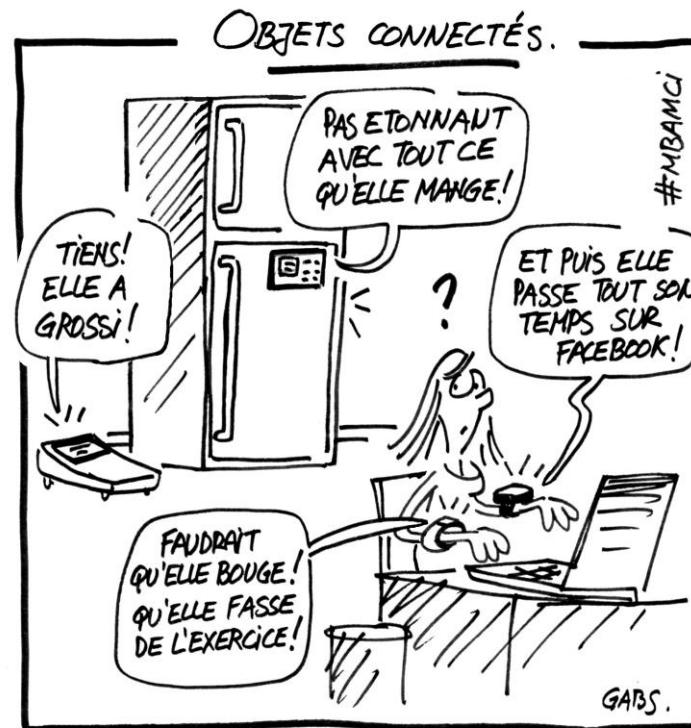
TV terrestre
500 MHz

Satellites 1 à 45 GHz (Ex TV 12
GHz, GPS 1.5 GHz)



introduction

- ▶ transmission de l'information dans un monde ultra-connecté

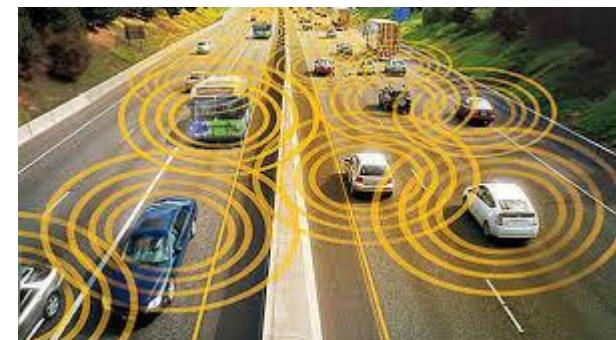


Introduction

- ▶ Moyen de transmission de l'information dans un monde ultra-connecté
 - Transports intelligents, objets connecté



anticollision radar~80 GHz
Toll ~6 GHz
Garage doors 433 MHz



Plan du cours

- ▶ Introduction
- ▶ **Composantes d'un système de transmission**
- ▶ Principe de la modulation
- ▶ Modulations analogiques
 - Modulations d'amplitude
 - modulations de phase et de fréquence
- ▶ Modulations numériques
- ▶ Principales architectures d'émission / réception

Composantes d'un système de transmission

- ▶ Systèmes de transmission pour partager l'information
 - Mais quel type d'information ?
 - Image, son, température, pression, données...
 - Signaux physiques (pas nécessairement électromagnétiques)
 - Les capteurs délivrent des signaux électriques qui variant de manière **analogue** aux variations physiques.
 - Ces variations sont continues aussi bien dans les valeurs que dans le temps.
 - Les signaux **analogiques**, sont souvent convertis au **numérique**, ils ont dès lors, des valeurs discrètes ou quantifiées à des instants discrets.



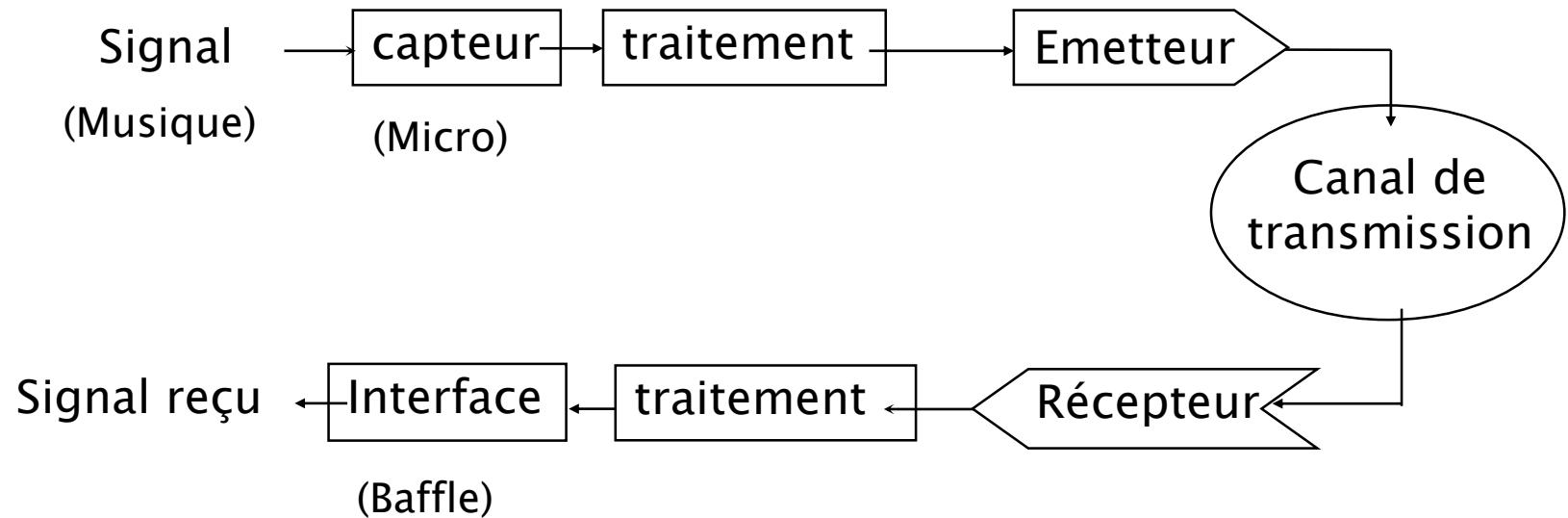
Composantes d'un système de transmission

► Modes de transmission



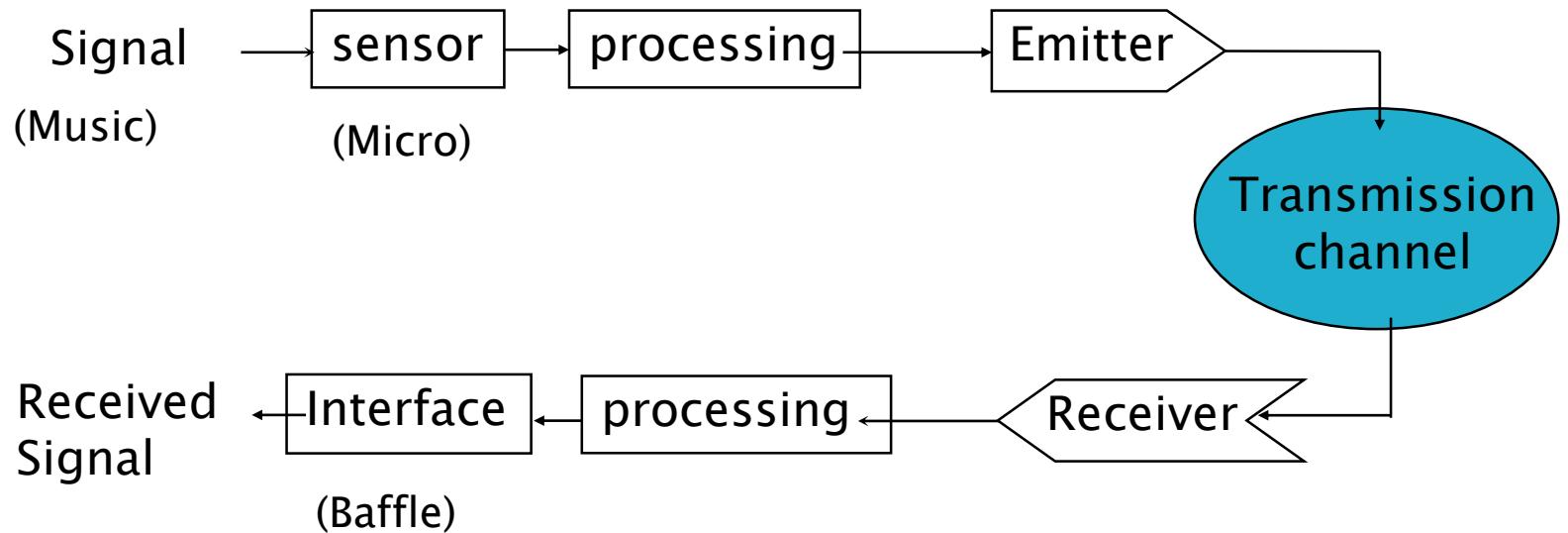
Composantes d'un système de transmission

- ▶ Transmission filaire ou sans fil



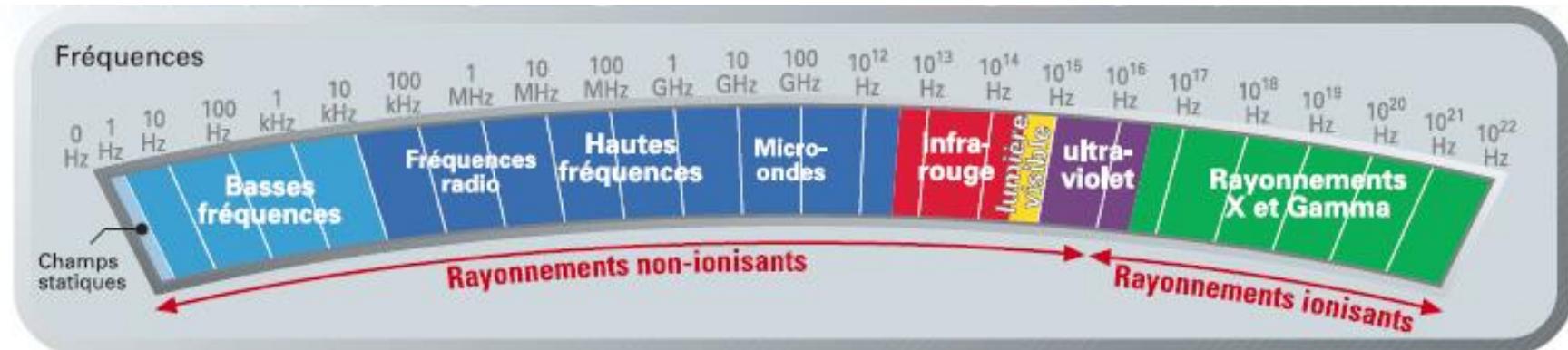
Transmission system components

- ▶ Transmission wired or wireless



Composantes d'un système de transmission

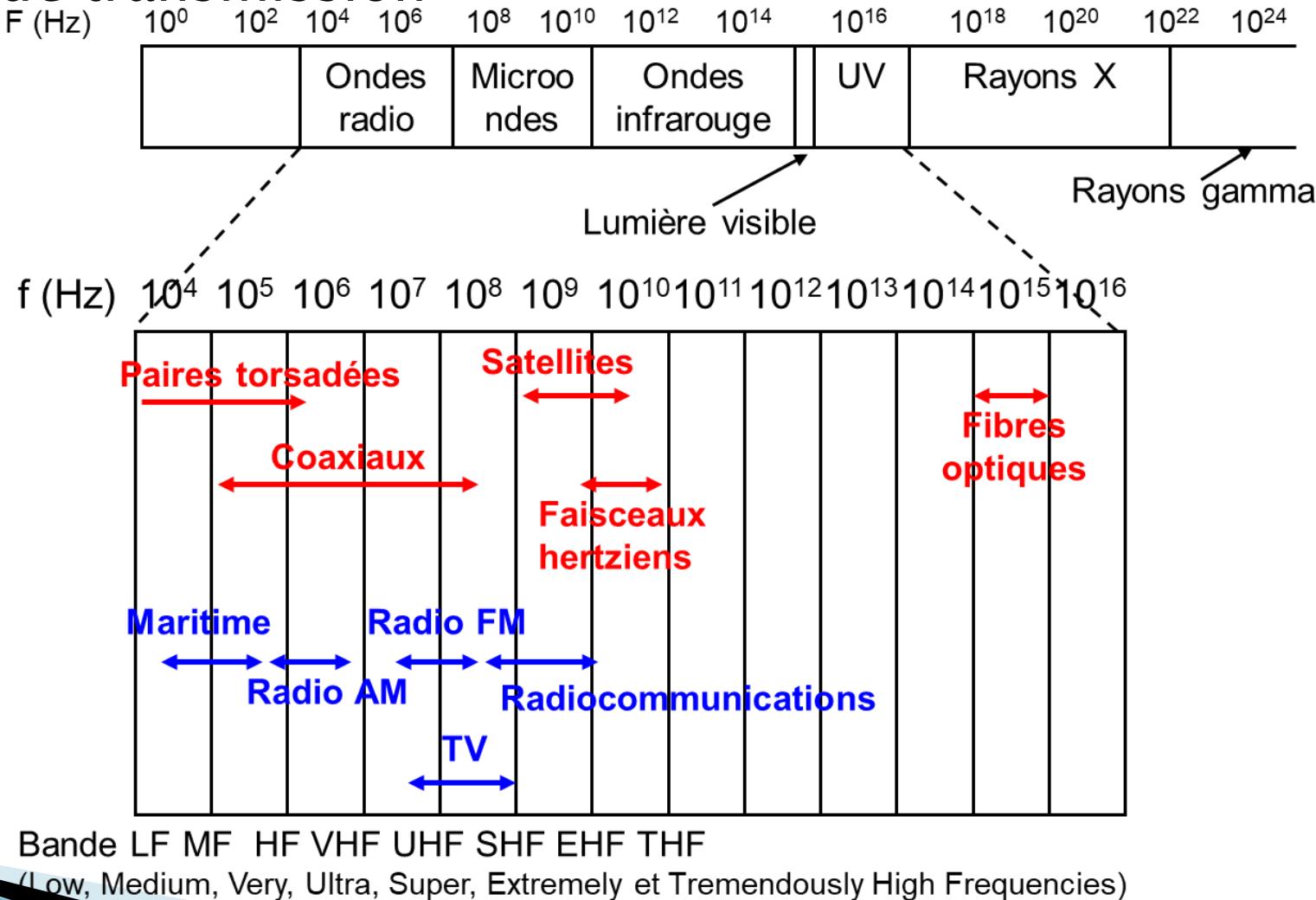
- ▶ Le spectre électromagnétique et ses bandes de fréquence



- ▶ Bande passante du canal de transmission
 - Caractérise tout canal de transmission, c'est la bande de fréquence qui reçoit correctement les signaux envoyés.
 - $W = F_{\max} - F_{\min}$
 - l'atmosphère élimine les UV
 - l'oreille humaine reçoit les signaux dans la bande 15–15000 Hz

Composantes d'un système de transmission

▶ Canal de transmission

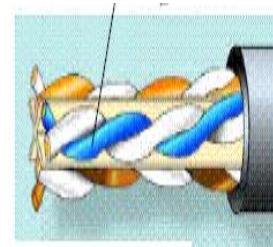


Composantes d'un système de transmission

▶ Canal de transmission

- Trois supports de transmission sont utilisés dans les réseaux filaires

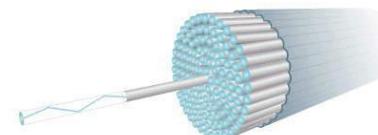
- La paire torsadée



- Le câble coaxial



- La fibre optique

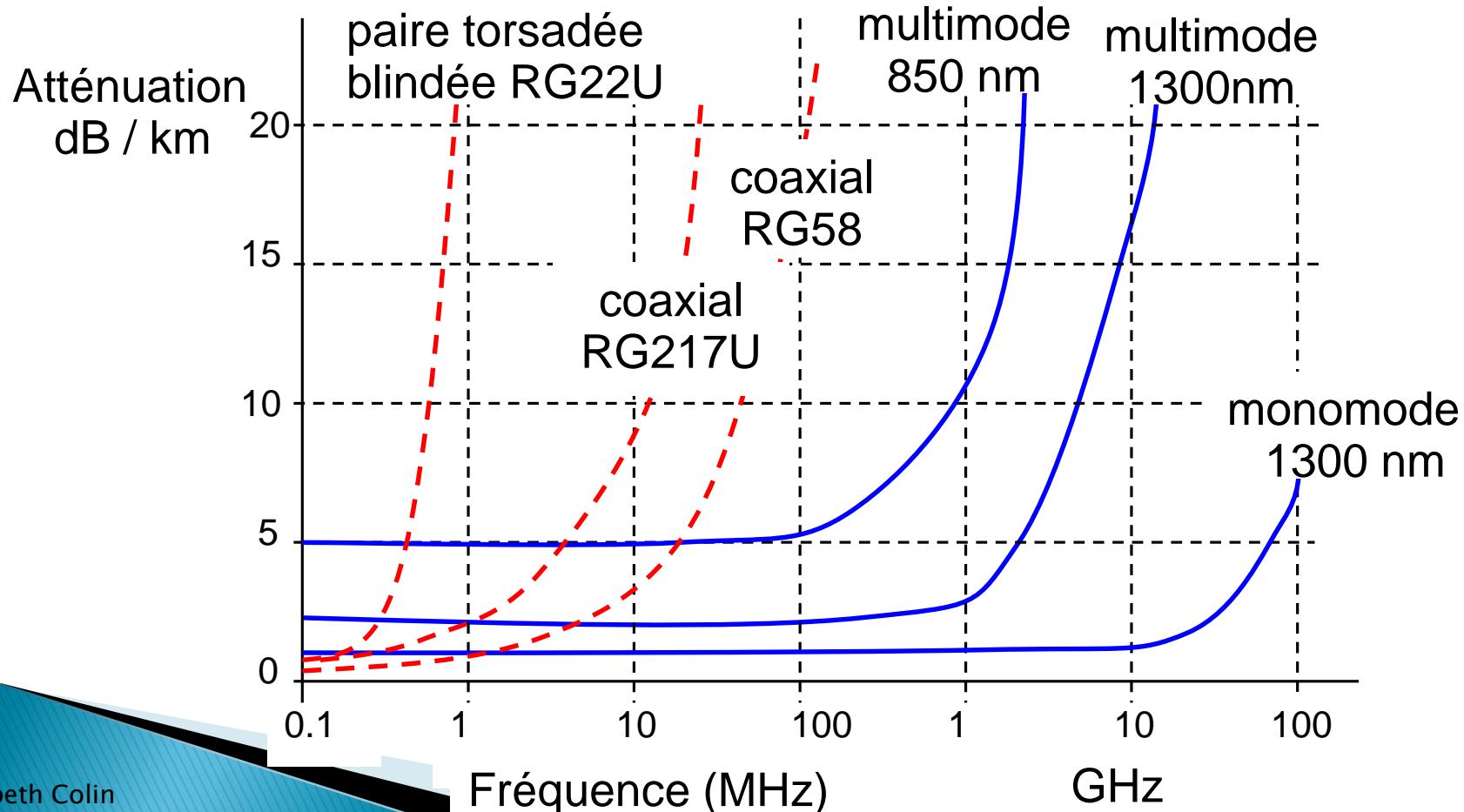


Composantes d'un système de transmission

- ▶ Le choix du support conditionne le débit maximal et la taille du réseau.
- ▶ Le choix d'un support détermine aussi les conditions de câblage
 - Flexibilité du support souhaitable ou non
 - Coût de la connectique
- ▶ Objectifs à atteindre dans le choix d'un câblage
 - grande bande passante,
 - possibilité d'utiliser ces câbles sur de longues distances,
 - faible encombrement, facile à poser et à installer,
 - connecteurs simples et résistants,
 - faible coût...

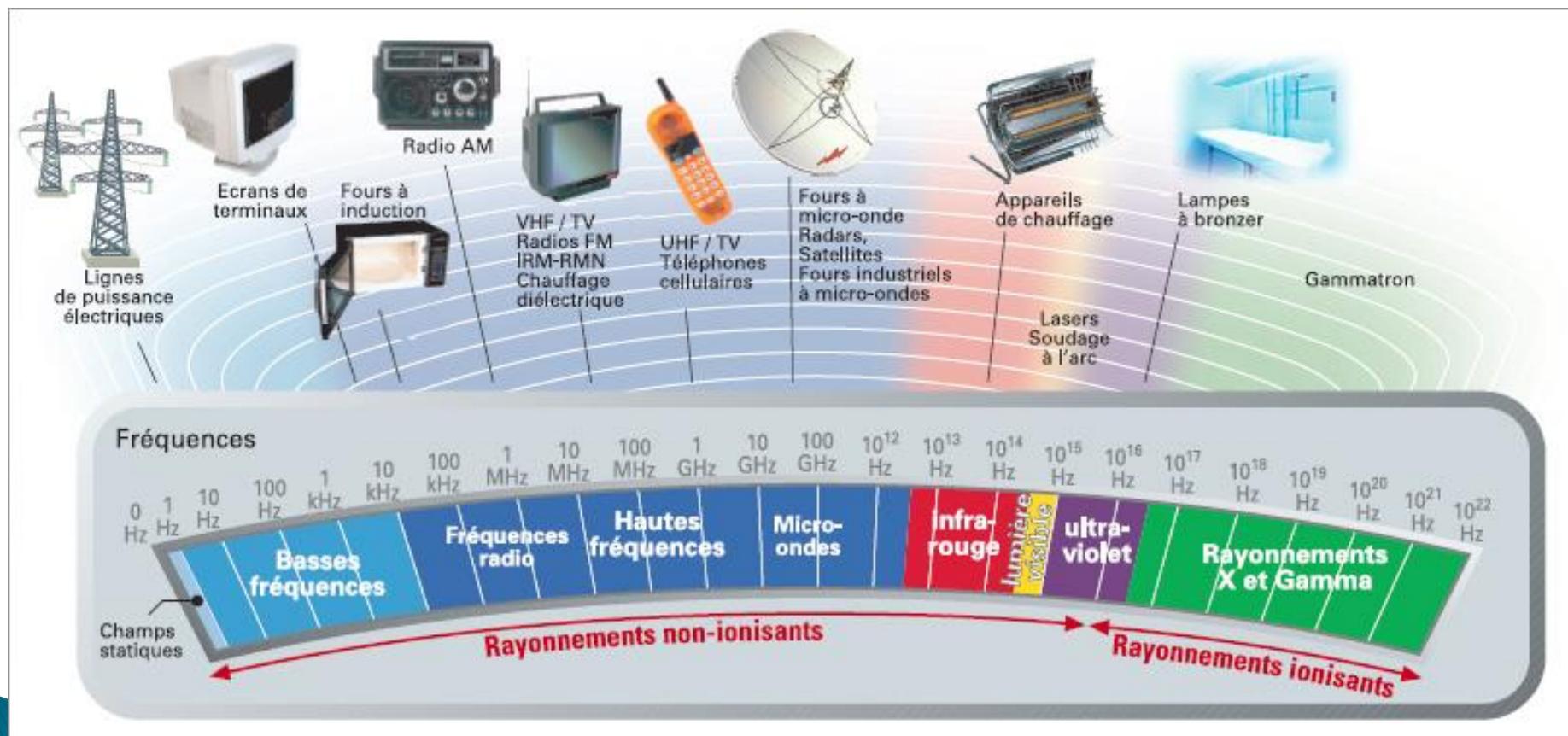
Composantes d'un système de transmission

- ▶ Comparaison bande passante des différents câbles à propagation guidée (BP dépendant de la portée de la liaison)



Composantes d'un système de transmission

▶ Bandes de fréquence des transmissions sans fil

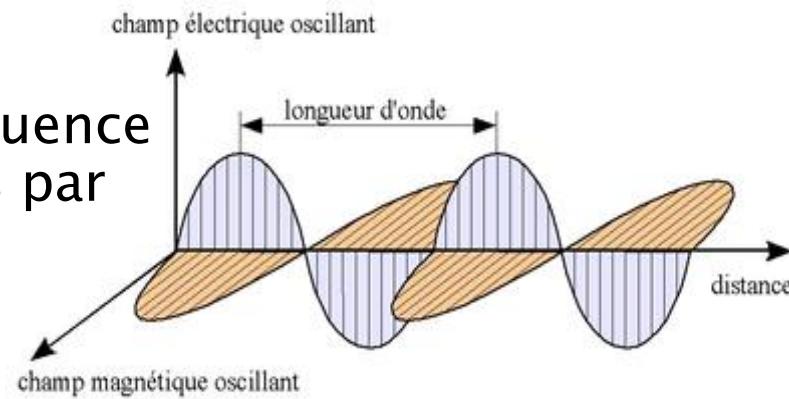


Composantes d'un système de transmission

- ▶ Choix d'une bande de fréquences dépendant :
 - Des distances de couverture souhaitées
 - Du débit nécessaire
 - Du mode de propagation privilégié
 - De la congestion du spectre EM
- ▶ Organismes de normalisation gérant l'attribution des fréquences :
 - Au niveau international : l'ITU (International Telecommunication Union, <http://www.itu.int>)
 - Au niveau européen :
 - L'ETSI (European Telecommunication Standard Institute, <http://www.etsi.org/>)
 - Le CEPT (Conférence Européenne des Postes et Télécommunications, <http://www.cept.org/>)
 - En France :
 - L'ARCEP (ancien ART, <http://www.arcep.com/>)
 - L'ANFR (Agence Nationale des Fréquences, <http://www.anfr.fr/>)

Composantes d'un système de transmission

- ▶ Dans un dispositif filaire ou sans fil, le signal transmis est une onde électromagnétique
 - Une onde est caractérisée par sa fréquence exprimée en Hertz (nombre de cycles par seconde)
 - Les fréquences utilisées pour les télécommunications mobiles et sans fil sont comprises entre 900 MHz et 6 GHz
 - Les ondes électromagnétiques se propagent dans l'air à la vitesse de la lumière (300 000 Km/s)



Plan du cours

- ▶ Introduction
- ▶ Composantes d'un système de transmission
- ▶ **Principe de la modulation**
- ▶ Modulations analogiques
 - Modulations d'amplitude
 - modulations de phase et de fréquence
- ▶ Modulations numériques
- ▶ Principales architectures d'émission / réception

Principe de la modulation

- ▶ Qu'est-ce que c'est la modulation ?
 - Traitement du signal qui consiste à modifier les caractéristiques d'un signal sinusoïdal (amplitude, phase) afin de transmettre un signal porteur d'information.
 - Le signal sinusoïdal modifié est appelé le signal modulé.
 - Le signal à transmettre est le signal modulant.
 - Le signal sinusoïdal initial est la porteuse $s_c(t)$
 - Le signal émis (modulant) varie ou module la porteuse.

$$s_c(t) = \overset{\text{Amplitude}}{\overbrace{A}} \cos \left(\underbrace{2\pi f_0 t + \varphi_0}_{\text{Angle}} \right)$$

Principe de la modulation

- ▶ Exemple de modulation d'amplitude :
 - L'amplitude du signal modulé porte l'information (signal modulant) $I(t)$:
 - $A \Rightarrow A[I(t)]$.

$$s(t) = A[I(t)] \times \cos(\omega_0 t + \varphi_0)$$

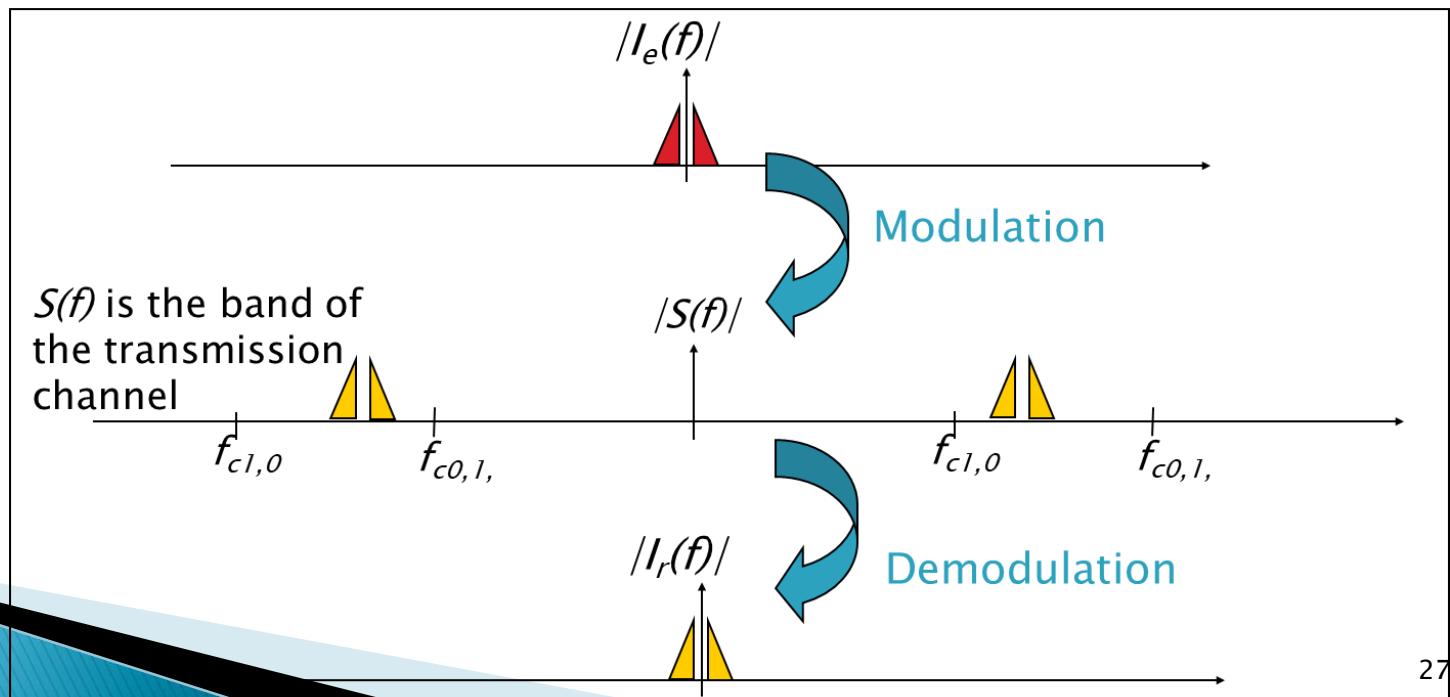
- $I(t)$: signal modulant
- $s(t)$: signal modulé

Principe de la modulation



▶ Pourquoi moduler ?

- Adapter le signal à la bande passante du canal de transmission.
 - Translation de la fréquence du signal émis (modulant)
 - Réduction de la taille des antennes

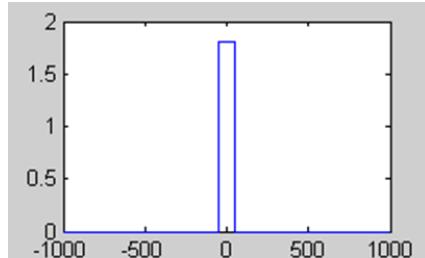


Principe de la modulation

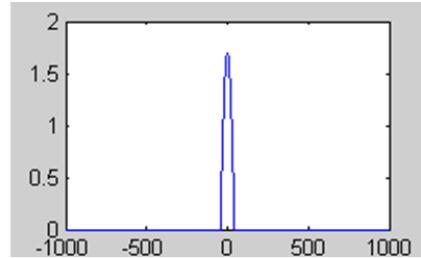
▶ Pourquoi moduler ?



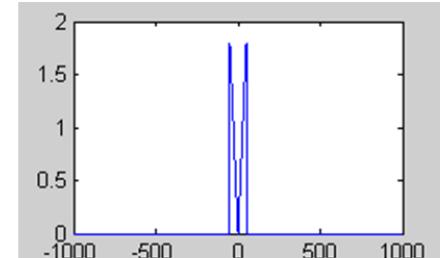
- Multiplexer plusieurs signaux dans le même support de transmission



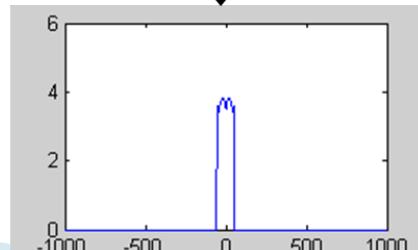
Spectrum of signal 1



Spectrum of signal 2



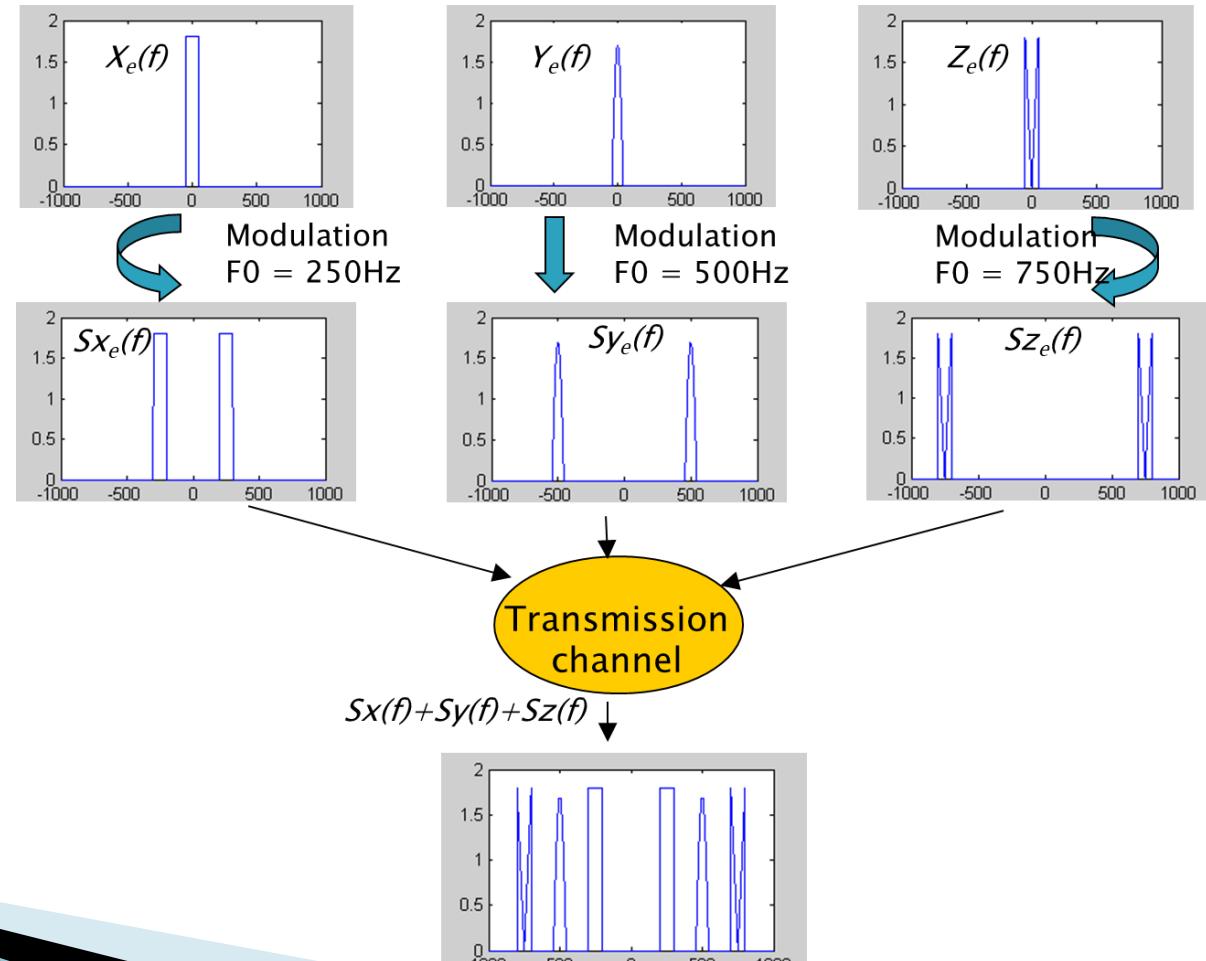
Spectrum of signal 3



Unable to disassociate the signals at the output of the transmission channel

Principe de la modulation

▶ Pourquoi moduler?



Plan du cours

- ▶ Introduction
- ▶ Composantes d'un système de transmission
- ▶ Principe de la modulation
- ▶ **Modulations analogiques**
 - Modulations d'amplitude
 - modulations de phase et de fréquence
- ▶ Modulations numériques
- ▶ Principales architectures d'émission / réception

Modulations analogiques

- ▶ Transmettre l'information du signal par un signal porteur
- ▶ L'information est un signal analogique : le **signal modulant**
- ▶ Le signal est transporté par un signal sinusoïdal: la **porteuse**
- ▶ Le signal résultant est : le **signal modulé**
- ▶ Le signal modulant peut moduler l'amplitude, la fréquence ou la phase de la porteuse.

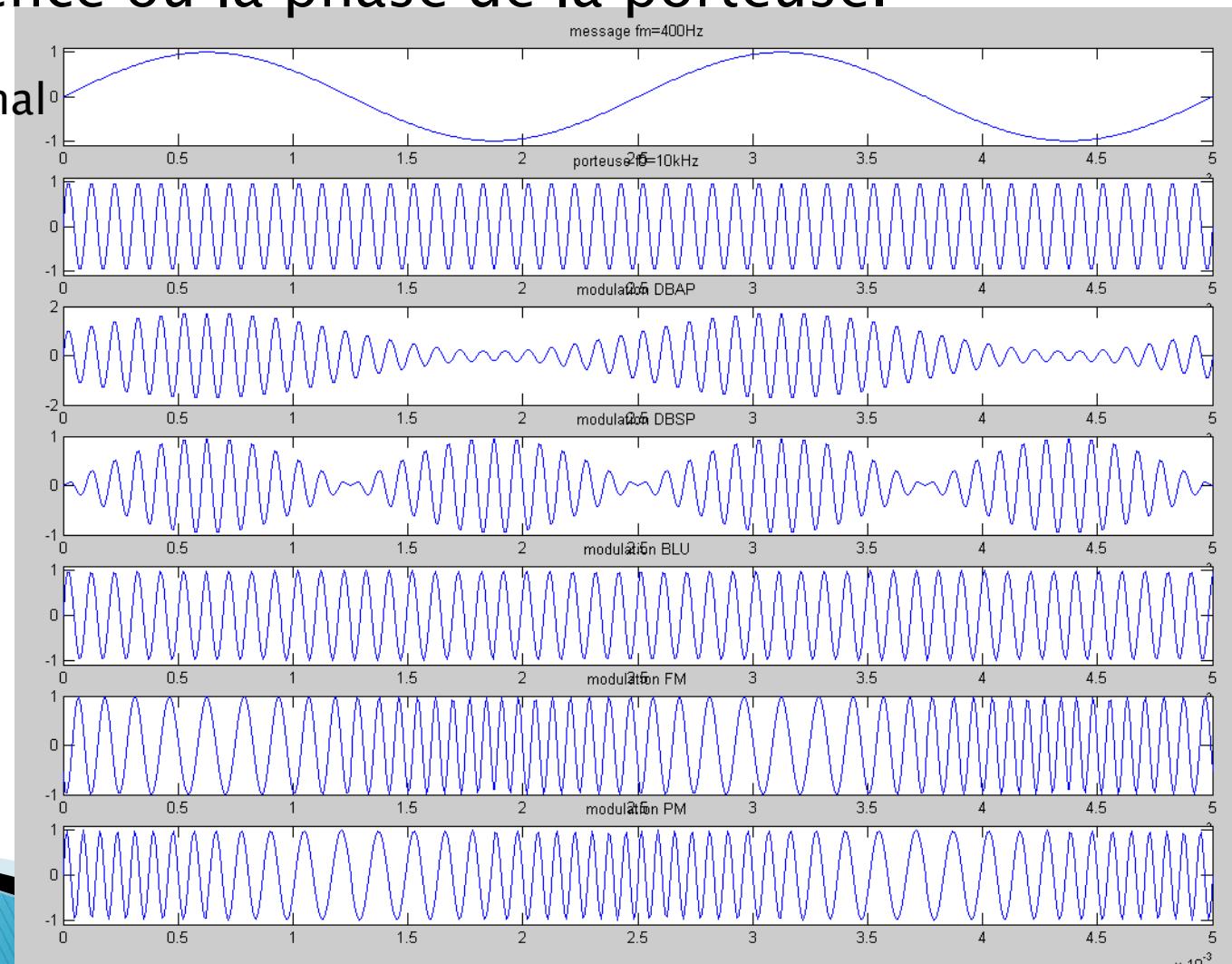
Modulations analogiques

- Le signal modulant peut moduler l'amplitude, la fréquence ou la phase de la porteuse.

Modulating signal

carrier

Modulated signals



Plan du cours

- ▶ Introduction
- ▶ Composantes d'un système de transmission
- ▶ Principe de la modulation
- ▶ **Modulations analogiques**
 - **Modulations d'amplitude**
 - modulations de phase et de fréquence
- ▶ Modulations numériques
- ▶ Principales architectures d'émission / réception

Modulation d'amplitude

- ▶ La porteuse

$$s_c(t) = \overbrace{A}^{\text{Amplitude}} \cos \underbrace{\left(2\pi f_0 t + \varphi_0 \right)}_{\text{Angle}}$$

- ▶ L'amplitude porte l'information du signal $I(t)$ appelé signal modulant :
 - $A \Rightarrow A[I(t)]$.

$$s(t) = A[I(t)] \times \cos(\omega_0 t + \varphi_0)$$

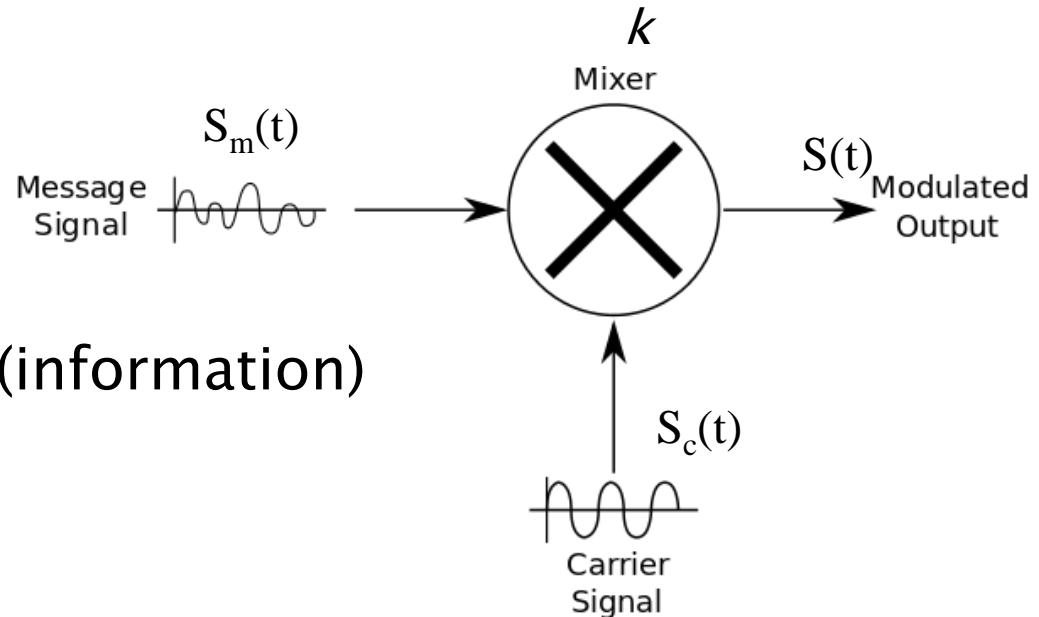
- $I(t)$: signal modulant
- $s(t)$: signal modulé

Plan du cours

- ▶ Introduction
- ▶ Composantes d'un système de transmission
- ▶ Principe de la modulation
- ▶ **Modulations analogiques**
 - **Modulations d'amplitude**
 - Double-sideband suppressed-carrier (DSB-SC)
 - Double-sideband modulation with carrier (DSB-WC)
 - Single-sideband modulation (SSB, or SSB-AM)
 - modulations de phase et de fréquence
- ▶ Modulations numériques
- ▶ Principales architectures d'émission / réception

Double-sideband suppressed-carrier (DSB-SC)

▶ Modulation



- Signal modulant (information)

$$S_m(t) = A_m \cos 2\pi f_m t$$

- Porteuse

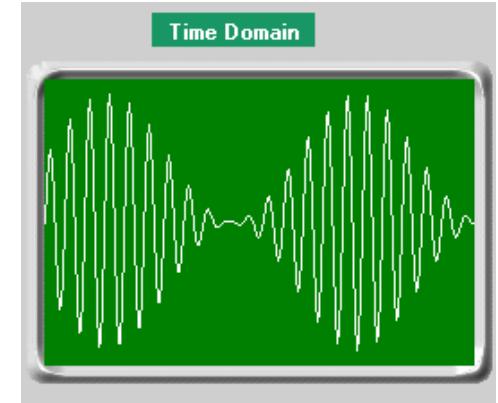
$$S_c(t) = A_c \cos 2\pi f_c t$$

- Signal modulé

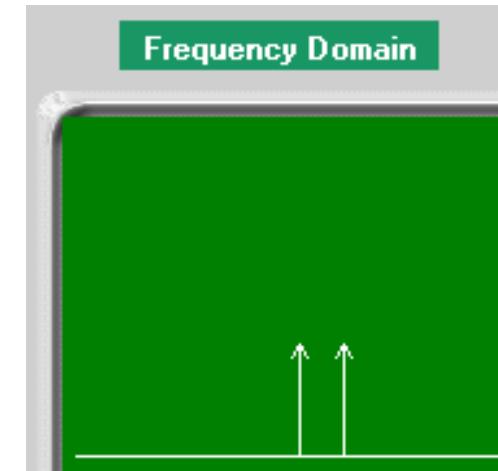
$$S(t) = k A_m A_c \cos 2\pi f_m t \cos 2\pi f_c t$$

Double-sideband suppressed-carrier (DSB-SC)

$$S(t) = k A_m A_c \cos 2\pi f_m t \cos 2\pi f_c t$$

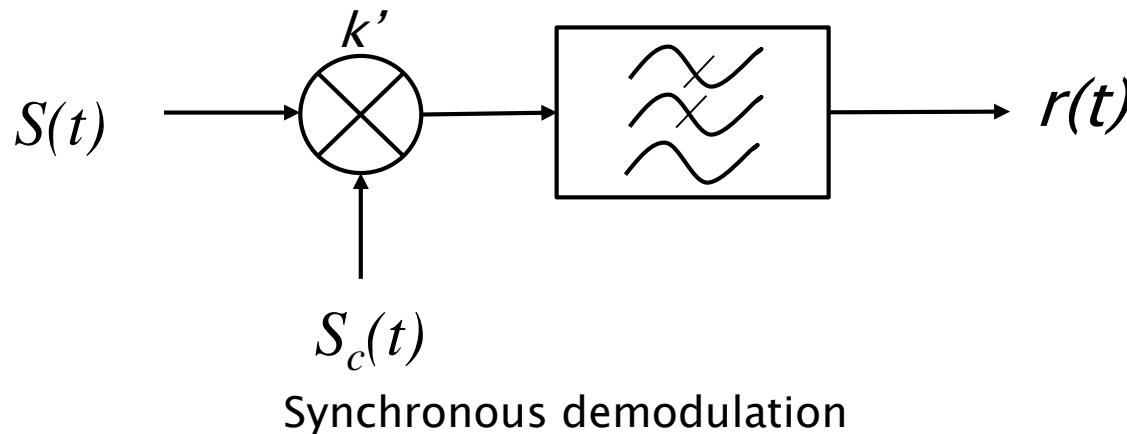


$$S(t) = (k A_m A_c / 2) [\cos 2\pi(f_c + f_m)t + \cos 2\pi(f_c - f_m)t]$$



Double-sideband suppressed-carrier (DSB-SC)

▶ Démodulation



- Porteuse

$$S_c(t) = A_c \cos 2\pi f_c t$$

- Signal modulé

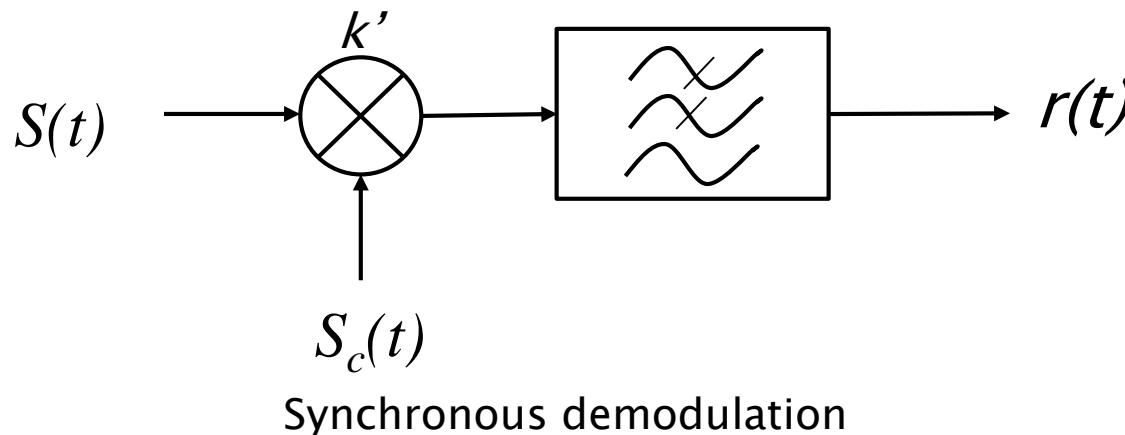
$$S(t) = kA_m A_c \cos 2\pi f_m t \cos 2\pi f_c t$$

Double-sideband suppressed-carrier (DSB-SC)

► Avantage

- Dans les modulations d'amplitude avec porteuse, une grande partie de la puissance du signal transmis est utilisé pour transmettre la porteuse
- Supprimer la porteuse permet de transmettre un signal dont la puissance ne sert qu'à émettre l'information.

Exercice : démodulation synchrone



- ▶ Donner l'expression du signal démodulé et dessiner son spectre.
- ▶ Nous étudions une légère désynchronisation de l'oscillateur local par rapport à la fréquence de la porteuse. On suppose, que la fréquence de l'oscillateur en reception est $f_c + \Delta f_c$. Écrire l'équation du signal à la sortie du filter passe-bas.

Double-sideband modulation with carrier (DSB-WC)

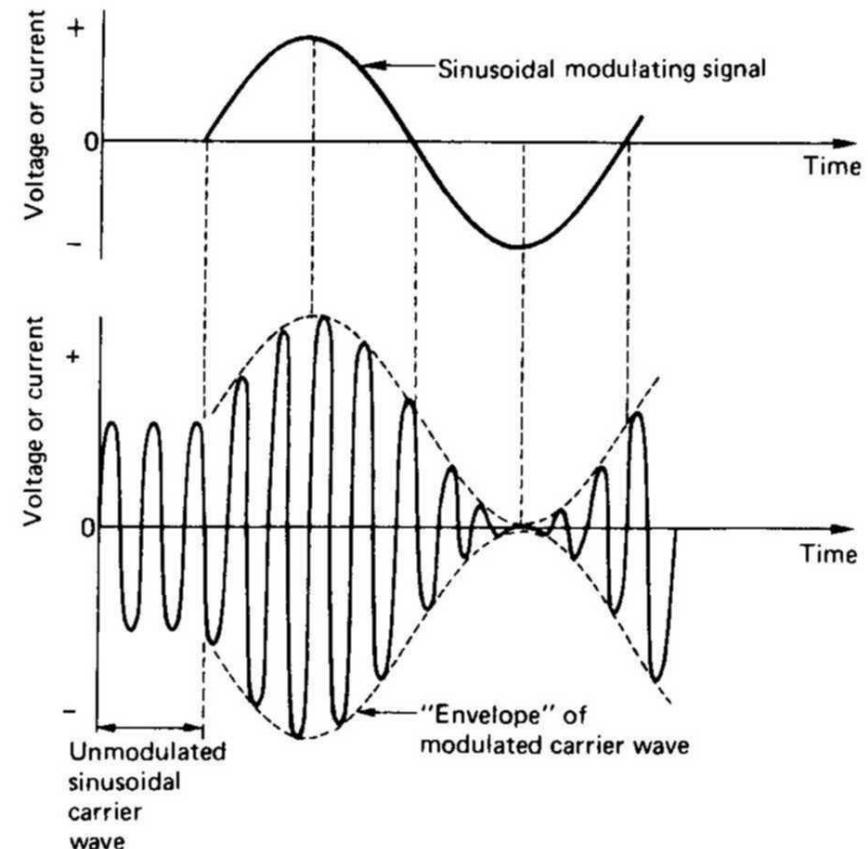
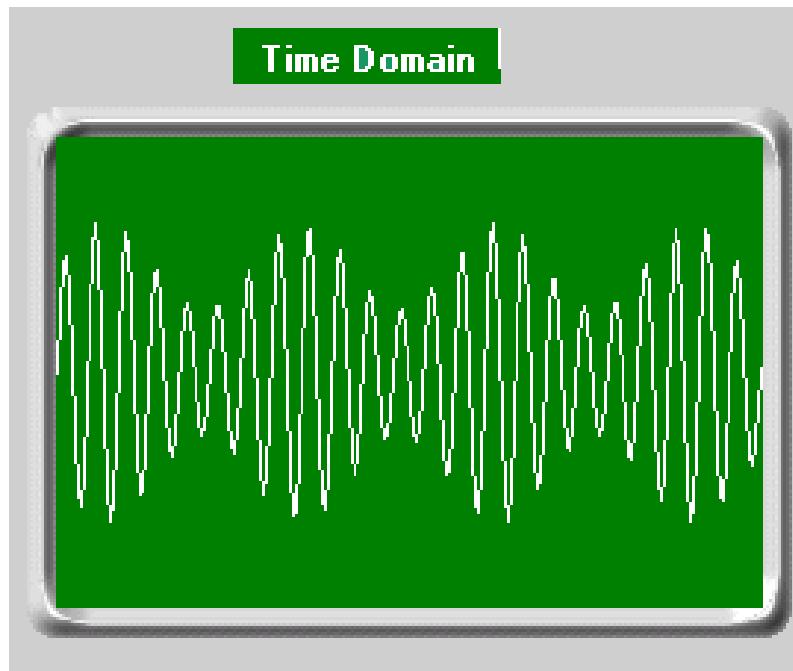
- ▶ Premier type de modulation utilisé pour la diffusion radio.
- ▶ Récepteur de grande simplicité.
- ▶ Utilisation massive
- ▶ A permis le développement de la diffusion radio dans années 20.

Double-sideband modulation with carrier (DSB-WC)

- ▶ $S_{DSB-SC}(t) = k A_c A_m \cos 2\pi f_c t \cos 2\pi f_m t$
- ▶ Afin d'éviter de reconstruire la porteuse en réception ($A_c \cos 2\pi f_c t$), elle est transmise avec le signal modulé.
- ▶ $m = kA_m$ indice de modulation (ou taux)
- ▶ $S(t) = A_c [1 + m \cos 2\pi f_m t] \cos 2\pi f_c t.$

Double-sideband modulation with carrier (DSB-WC)

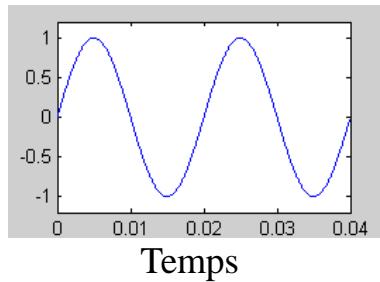
► $S(t) = A_c [1 + m \cos 2\pi f_m t] \cos 2\pi f_c t.$



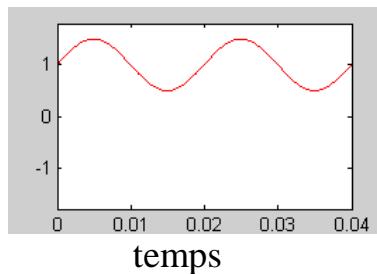
Double-sideband modulation with carrier (DSB-WC)

Amplitude du signal modulé Enveloppe du signal modulé

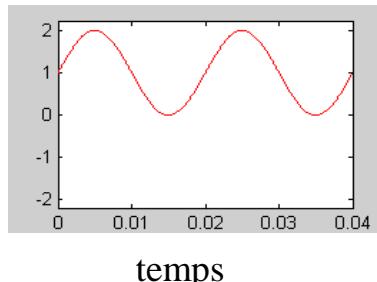
Signal modulé



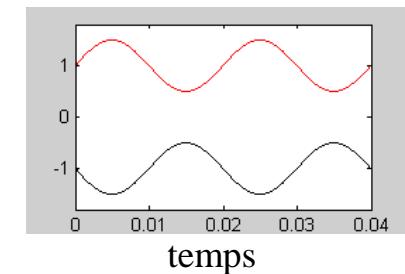
$$m < 1$$



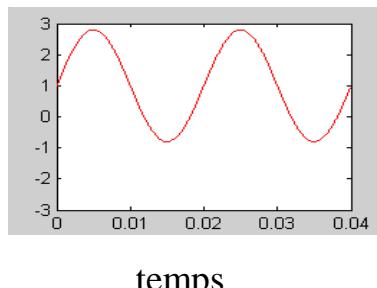
$$m = 1$$



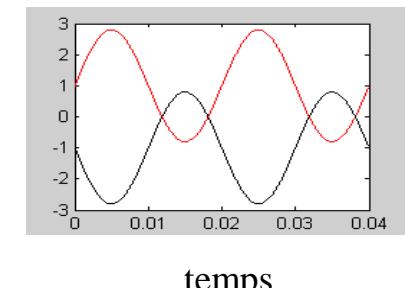
$$m > 1$$



temps



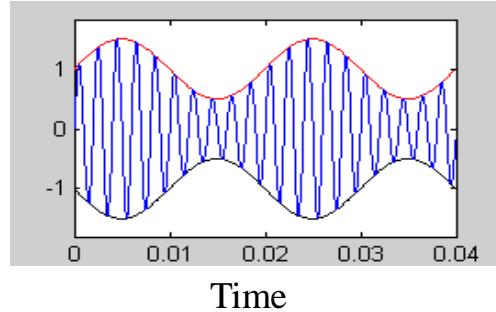
temps



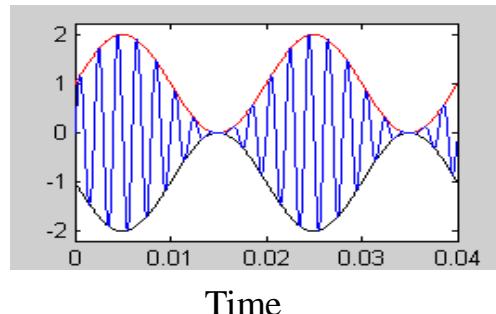
temps

Double-sideband modulation with carrier (DSB-WC)

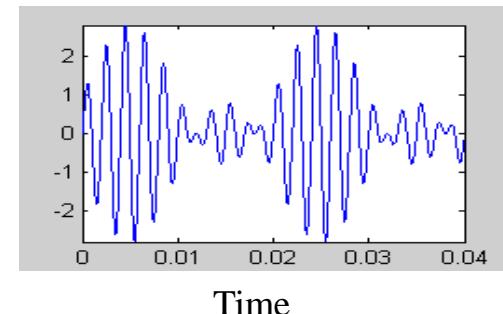
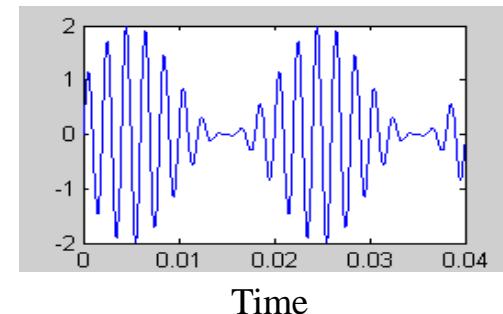
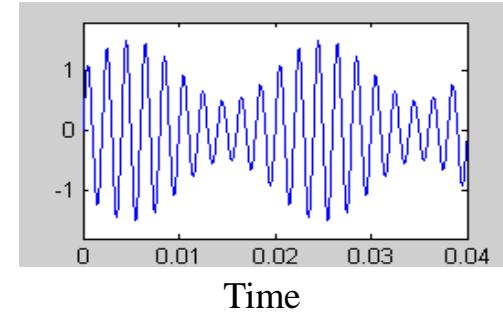
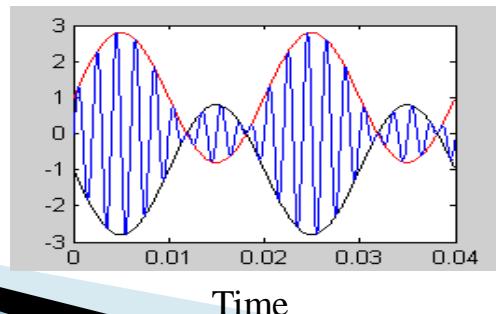
$m < 1$



$m = 1$

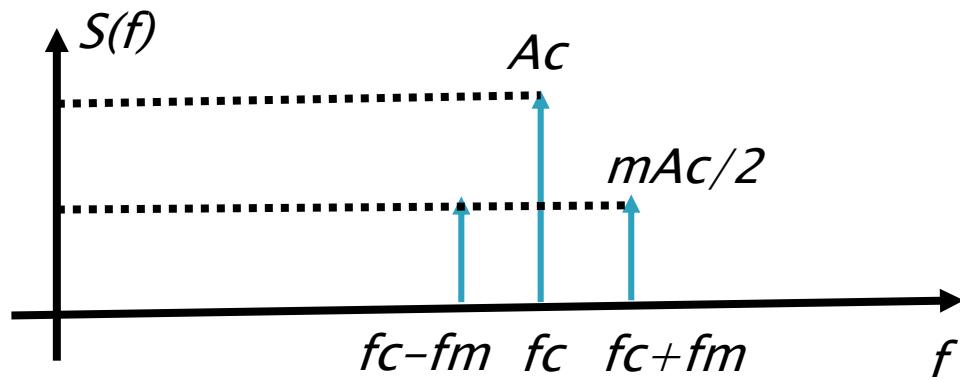


$m > 1$



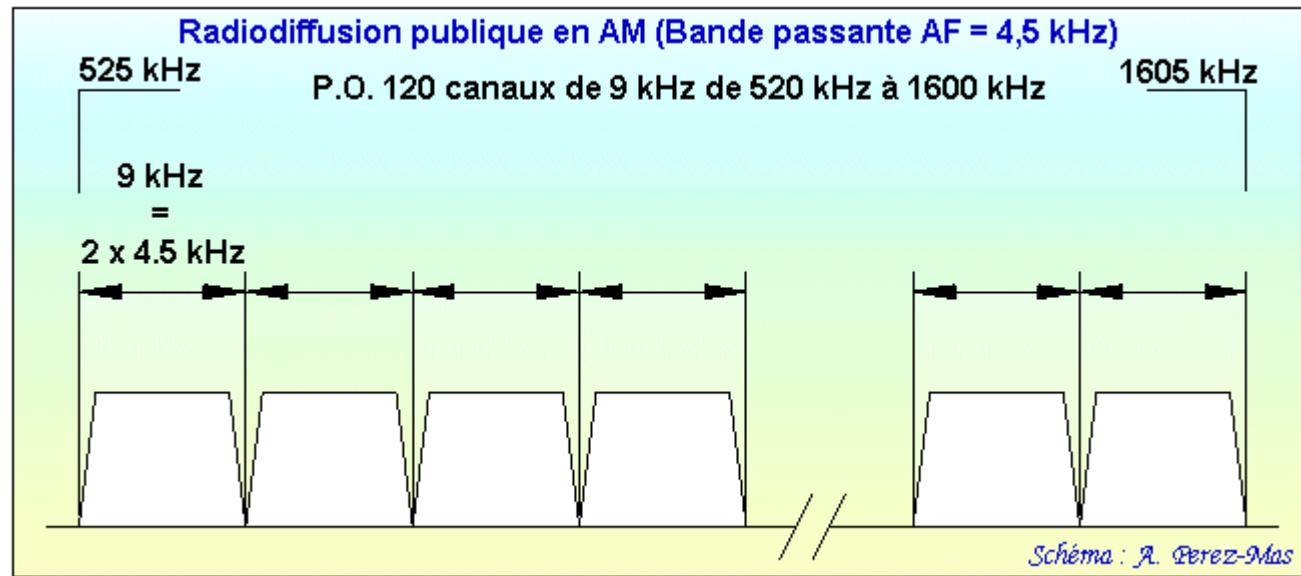
Double-sideband modulation with carrier (DSB-WC)

- ▶ $S(t) = A_c [1 + m \cos 2\pi f_m t] \cos 2\pi f_c t.$
- ▶ $S(t) = A_c \cos 2\pi f_c t + (mA_c/2)[\cos 2\pi(f_c + f_m)t + \cos 2\pi(f_c - f_m)t].$



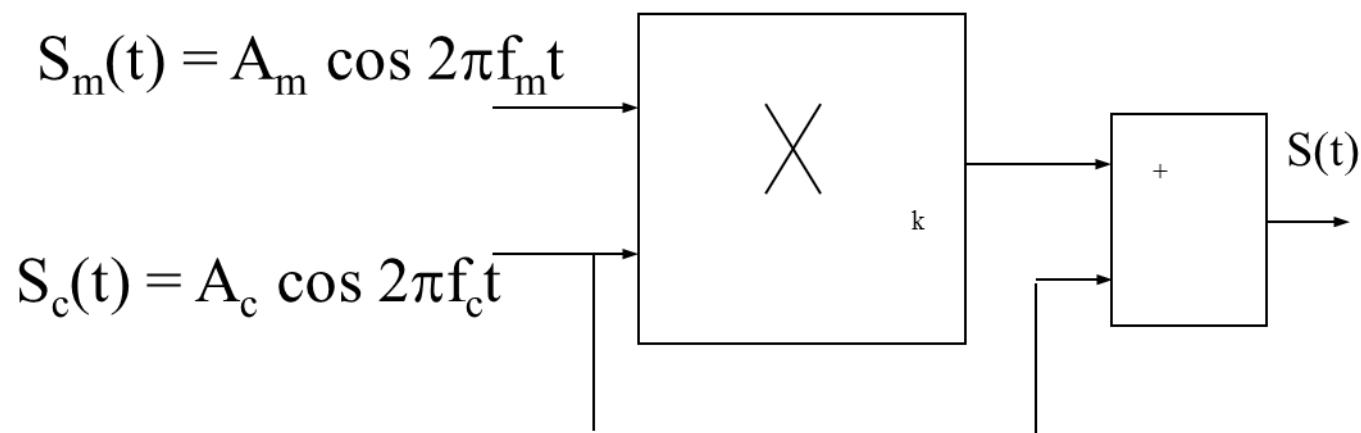
Double-sideband modulation with carrier (DSB-WC)

- ▶ Une norme internationale fixe, pour les stations de radiodiffusion AM, une bande de fréquence de 9 kHz maximum (2 bandes latérales de 4,5 kHz).
- ▶ Donc 120 canaux d'une largeur de 525 kHz à 1605 kHz pour 120 émetteurs



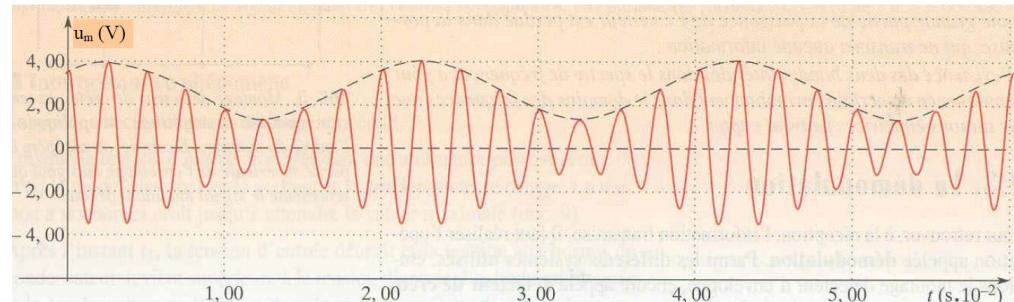
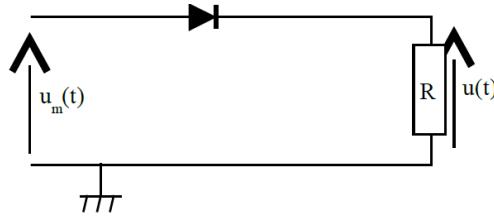
Double-sideband modulation with carrier (DSB-WC)

► Modulation

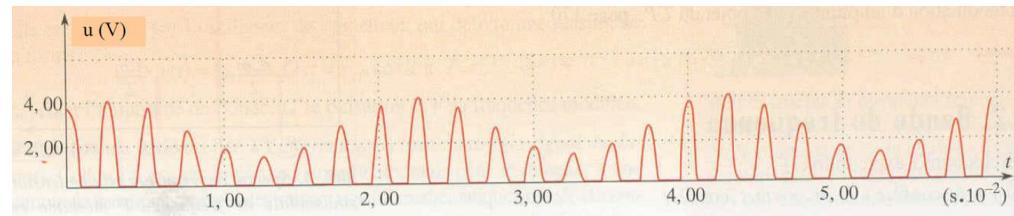
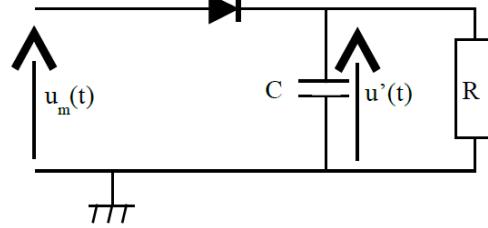


Démodulateur à diode (détecteur d'enveloppe)

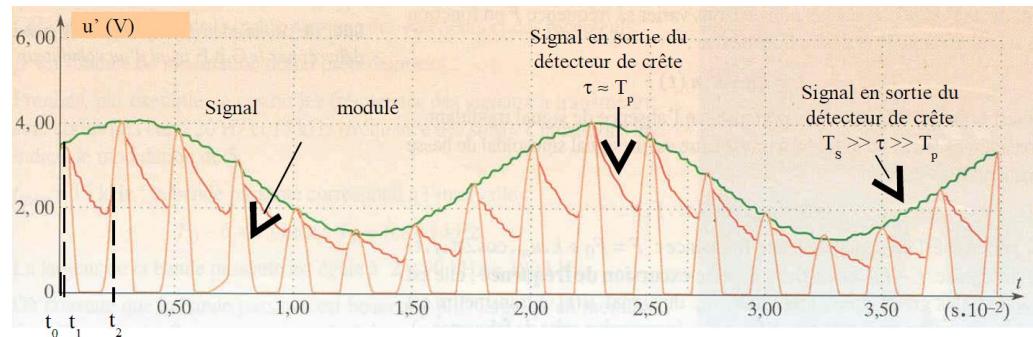
► Avant redressement



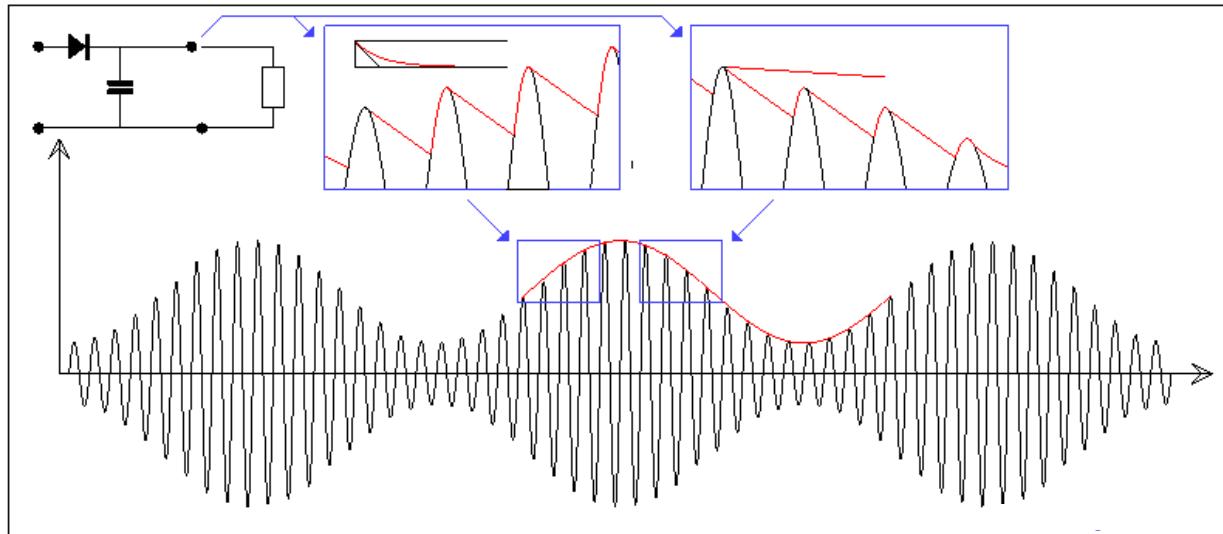
► Après redressement



Le résultat



Démodulateur à diode : Calcul de la constante de temps RC.



$$\frac{m 2 \pi f_m}{\sqrt{1-m^2}} < \frac{1}{RC} \ll f_c$$

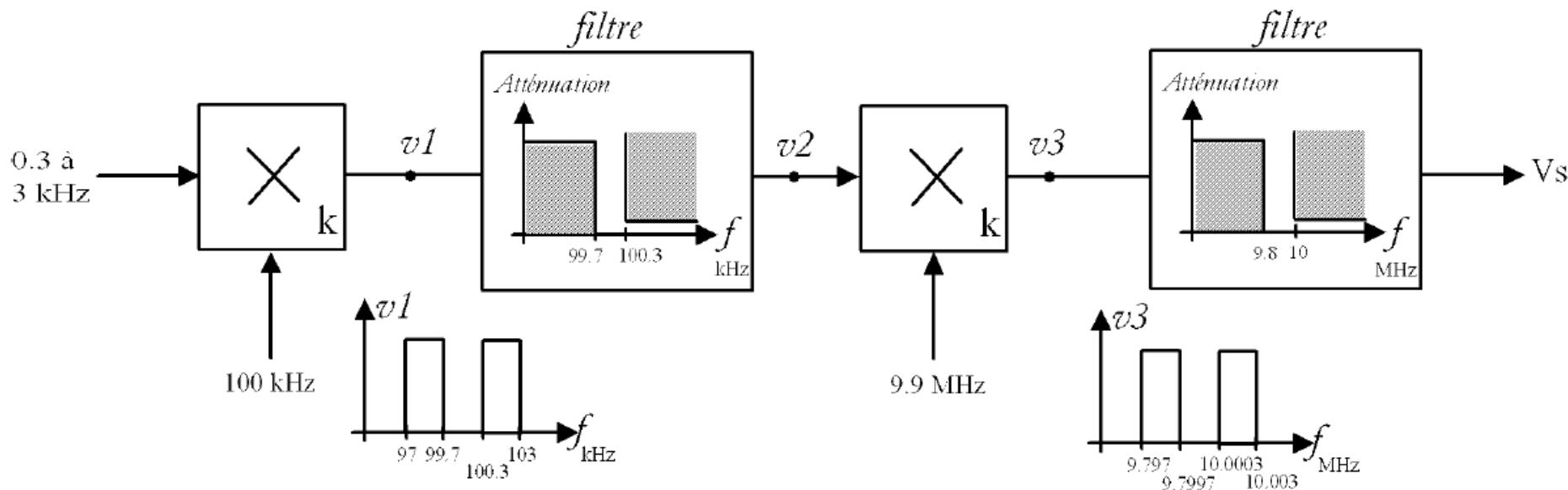
- ▶ Diodes de type Schottky ou à pointe (seuil = 100mV)
- ▶ mise en œuvre de redresseurs ultra linéaires à base d 'AOP

Principe de la modulation BLU (SSB).

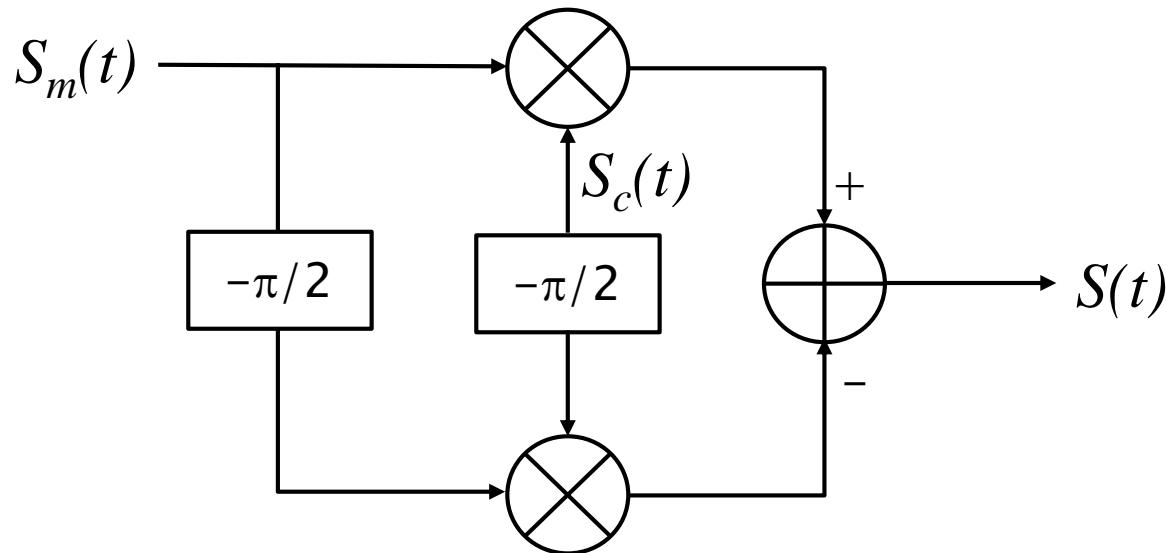
- ▶ La modulation DBL n'a pas l'efficacité maximale, car une seule bande latérale, transportant au maximum $1/6^\circ$ de la puissance totale de la modulation classique suffit pour transmettre toute l'information.
- ▶ Surdimensionnement des étages de puissance de sortie des émetteurs.
- ▶ La BLU ne conserve qu'une bande latérale (LSB ou USB).

$$S(t) = \frac{kA_c A_m}{2} \cos 2\pi(f_c + f_m)t$$

Production du signal BLU par filtrage d'un signal DBLSP.

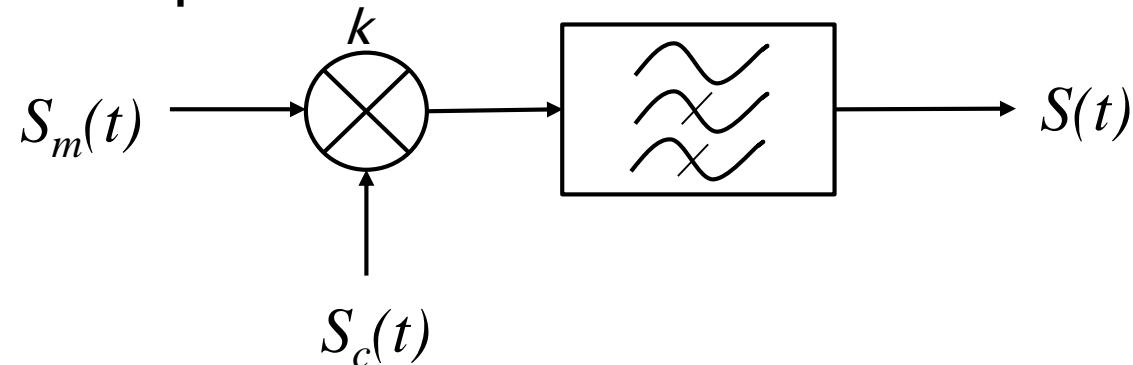


Production du signal BLU par déphasage.



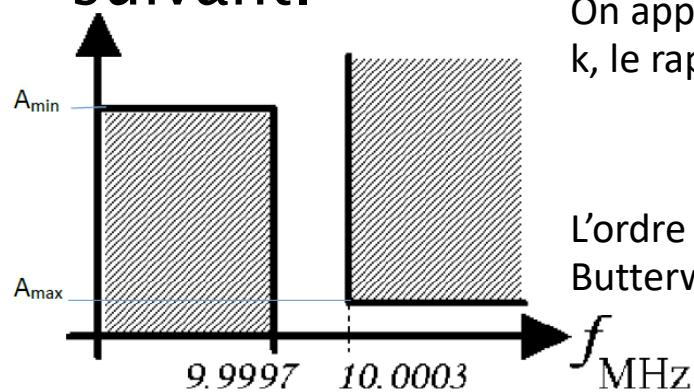
Single-sideband modulation (SSB, or SSB-AM)

- ▶ Exercice :
 - ▶ Nous voulons transmettre un signal qui s'étend sur une plage de fréquence de 300 Hz à 3 kHz, en modulant à l'aide d'une porteuse $f_c = 10$ MHz.
1. Quelle est l'extension des bandes latérales supérieures et inférieures après multiplication par la porteuse ?
 2. Quel est l'écart fréquentiel entre ces deux bandes ?



Single-sideband modulation (SSB, or SSB-AM)

- Pour ne garder que la bande latérale supérieure, nous utilisons un filtre passe-haut avec le gabarit suivant.



On appelle sélectivité du filtre passe-bas k, le rapport

$$k = \frac{f_c + f_{min}}{f_c - f_{min}} = \frac{10,0003}{9,9997}$$

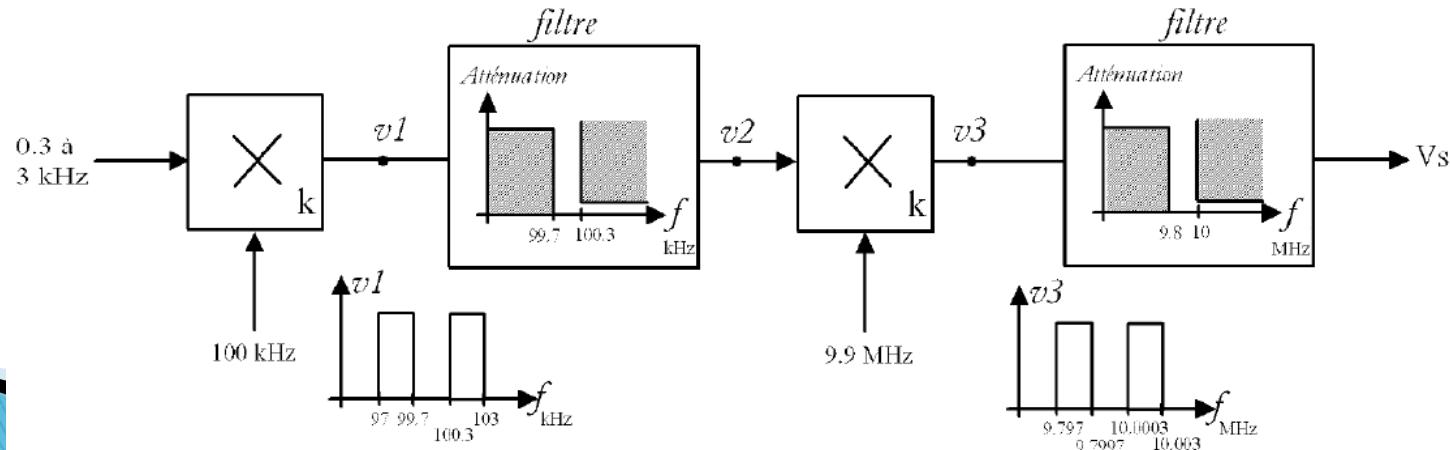
$$n \geq \frac{\ln\left(\frac{A_{min}^2 - 1}{\varepsilon^2}\right)}{2 \ln k}$$

L'ordre du filtre est pour un filtre de Butterworth

3. avec $\varepsilon = 1$ pour une fréquence de coupure définie à -3 dB et que l'on estime qu'une bande est négligeable par rapport à l'autre si son amplitude est au moins 100 fois inférieure
4. Déterminer l'ordre du filtre nécessaire pour obtenir un signal BLU par filtrage direct d'un signal

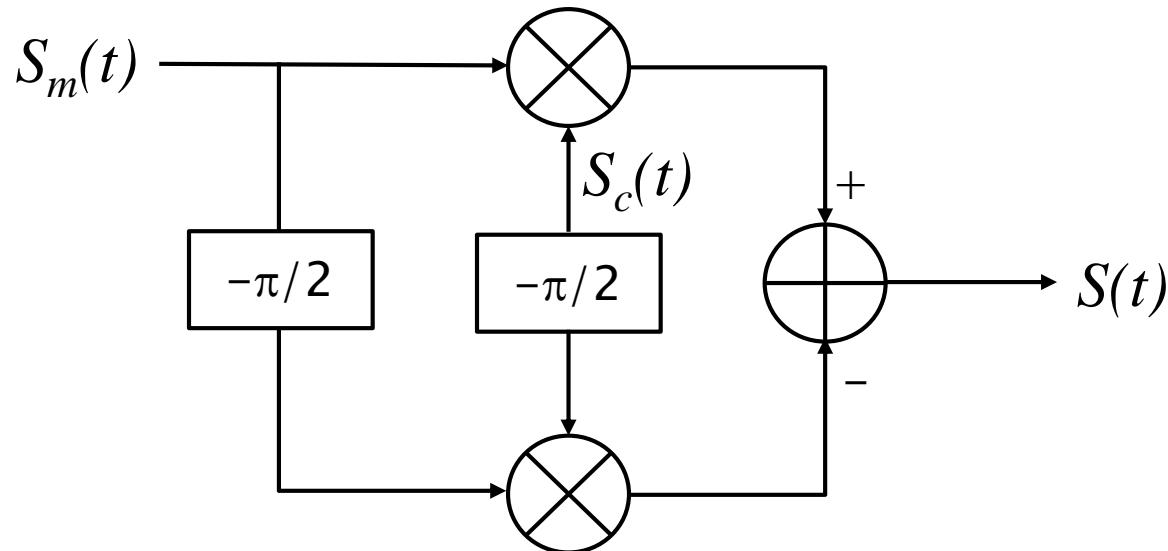
Single-sideband modulation (SSB, or SSB-AM)

- ▶ On peut alors procéder par deux changements de fréquence, suivant le schéma synoptique de la figure ci-dessous
4. Quelle est la plage de fréquence des bandes à la sortie du premier mélangeur ?
 5. Même question à la sortie du premier filtre, du second mélangeur et du dernier filtre ? Conclure



Single-sideband modulation (SSB, or SSB-AM)

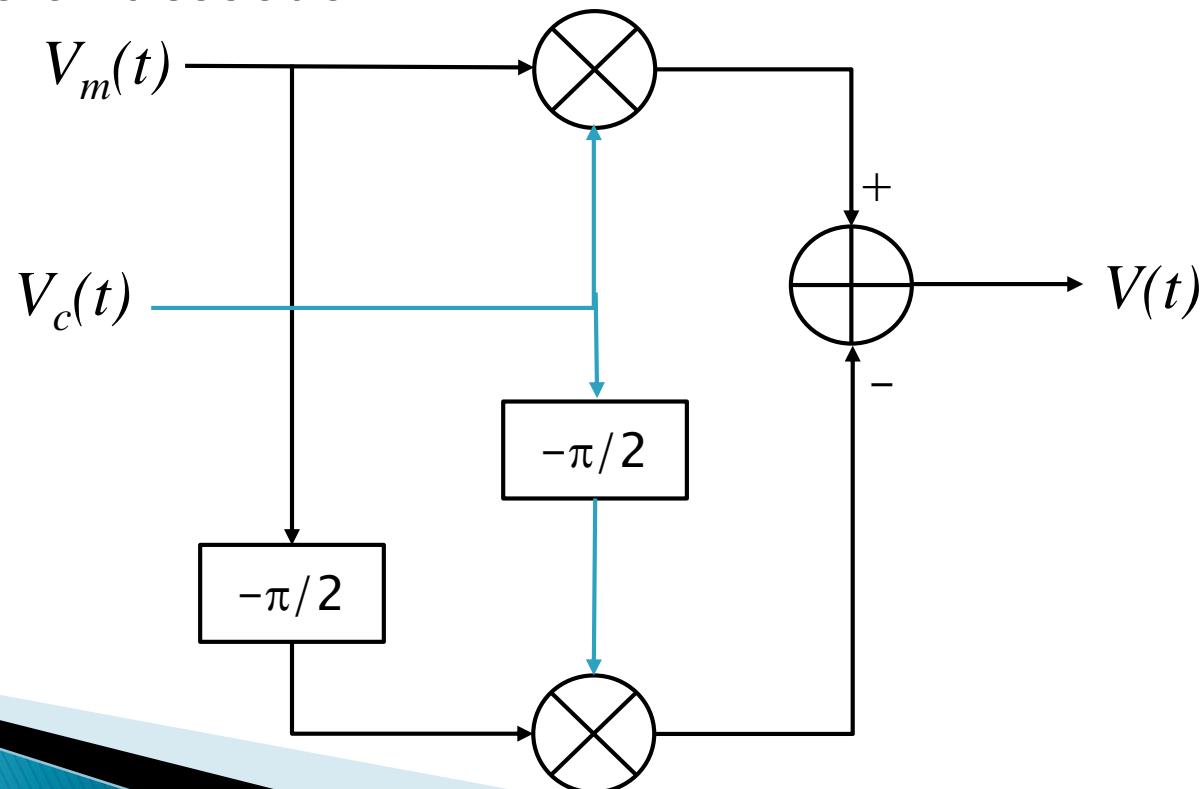
- ▶ Modulation schéma 2



Single-sideband modulation (SSB, or SSB-AM)

► Exercice

- Montrer que le signal B-L-U peut donc être élaboré par un dispositif conforme au schéma synoptique de la figure ci-dessous.



Single-sideband modulation (SSB, or SSB-AM)

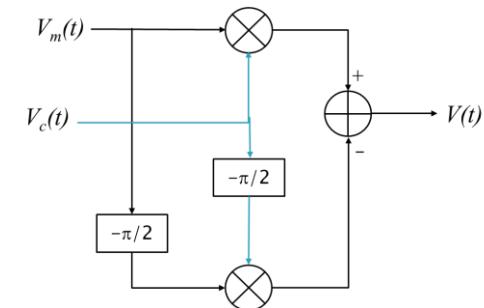
► Exercice

2. Montrer qu'un petit déphasage $\Delta\phi$ entre la porteuse et le signal donne :

$$V(t) = k_0 A_c A_m \left[\cos \frac{\varphi}{2} \cos [2\pi(f_m + f_c)t + \frac{\varphi}{2}] - \sin \frac{\varphi}{2} \sin [2\pi(f_c - f_m)t - \frac{\varphi}{2}] \right]$$

3. Sachant que l'on peut considérer qu'une composante latérale est éliminée si elle est atténuée de 40 décibels par rapport à l'autre, quelle doit être la valeur maximale de l'écart φ de déphasage autorisé?

Aucun dispositif ne peut convenir pour déphaser de 90° le signal de modulation dont la fréquence f_m varie entre 300 Hz et 3 kHz. On réalise alors un banc de déphaseurs par la mise en cascade de déphaseurs de 90° sur des fréquences décalées, respectivement 49,85 Hz, 206 Hz, 597 Hz, 1 658 Hz, 4 853 Hz, 20 060 Hz.



Plan du cours

- ▶ Introduction
- ▶ Composantes d'un système de transmission
- ▶ Principe de la modulation
- ▶ **Modulations analogiques**
 - Modulations d'amplitude
 - **modulations de phase et de fréquence**
- ▶ Modulations numériques
- ▶ Principales architectures d'émission / réception

Principe de la modulation de phase et de fréquence

- ▶ Signal émis $S(t) = A_c \cos[2\pi f_c t + \varphi(t)]$
- ▶ Modulation de phase :
 - $\varphi(t)$ est proportionnel au signal modulant
 - $\varphi(t) = k S_m(t)$.
 - k est la sensibilité de modulation en Hz.V^{-1} .
- ▶ Modulation de fréquence :
 - La variation de la fréquence instantannée est proportionnelle au signal modulant
 - $\frac{d\varphi(t)}{dt} = k S_m(t)$

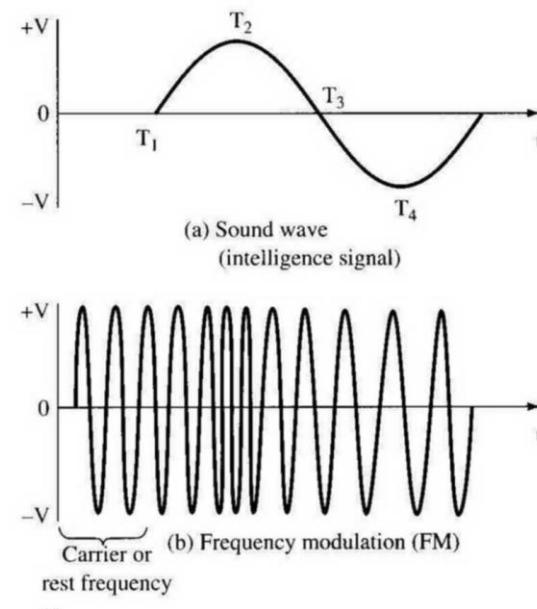
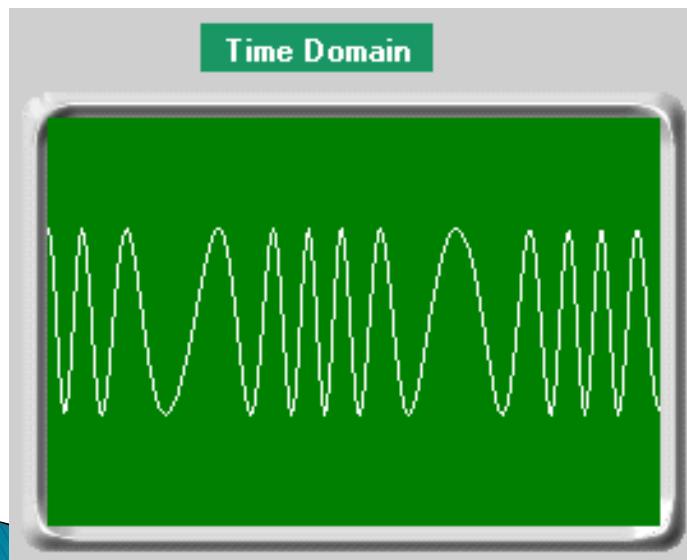
Modulation de fréquence d'une sinusoïde

▶ Signal Modulé :

- $s(t) = A_c \cos[2\pi f_c t + \beta \sin(2\pi f_m t)].$
- ▶ La fréquence instantanée est $f_c + \beta f_m \cos(2\pi f_m t)$.
 - $\beta \sin(2\pi f_m t)$ = *déviation de phase*.
 - β , sa valeur maximale est *l'indice de modulation*
 - $\beta f_m \cos(2\pi f_m t)$ = *déviation de fréquence*.
- ▶ La valeur maximale Δf (*excursion de fréquence*) est liée à l'indice de modulation par $\Delta f = \beta f_m$

Forme du signal

- ▶ Si le signal modulant est inconnu, l'observation du signal transmis sur un oscilloscope ne permet pas de conclure à une modulation de phase ou de fréquence.



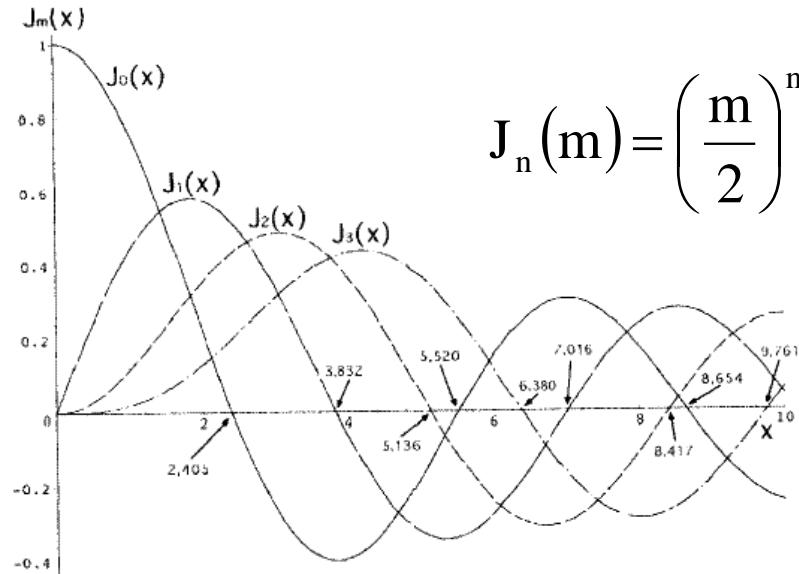
Spectre du signal FM

- ▶ $S(t) = A_c \cos[2\pi f_c t + \beta \sin(2\pi f_m t)]$
 $= A_c [a(t) \cos(2\pi f_c t) - b(t) \sin(2\pi f_c t)].$
- ▶ **a(t) = $\cos(\beta \sin(2\pi f_m t))$.**
 - décomposition mathématique :
 $a(t) = J_0(\beta) + 2 J_2(\beta) \cos(2\pi 2f_m t) + \dots$
- ▶ **b(t) = $\sin(\beta \sin(2\pi f_m t))$.**
 - décomposition mathématique :
 $b(t) = 2J_1(\beta) \sin(2\pi f_m t) + 2 J_3(\beta) \sin(2\pi 3f_m t) + \dots$

Fonctions de Bessel de première espèce

$$\begin{aligned}
 S(t) = & A_c \{ J_0(\beta) \cos(2\pi f_c t) \\
 & + J_1(\beta) [\cos(2\pi(f_c - f_m)t) - \cos(2\pi(f_c + f_m)t)] \\
 & + J_2(\beta) [\cos(2\pi(f_c - 2f_m)t) - \cos(2\pi(f_c + 2f_m)t)] \\
 & + \dots + J_n(\beta) [\cos(2\pi(f_c - nf_m)t) - \cos(2\pi(f_c + nf_m)t)]
 \end{aligned}$$

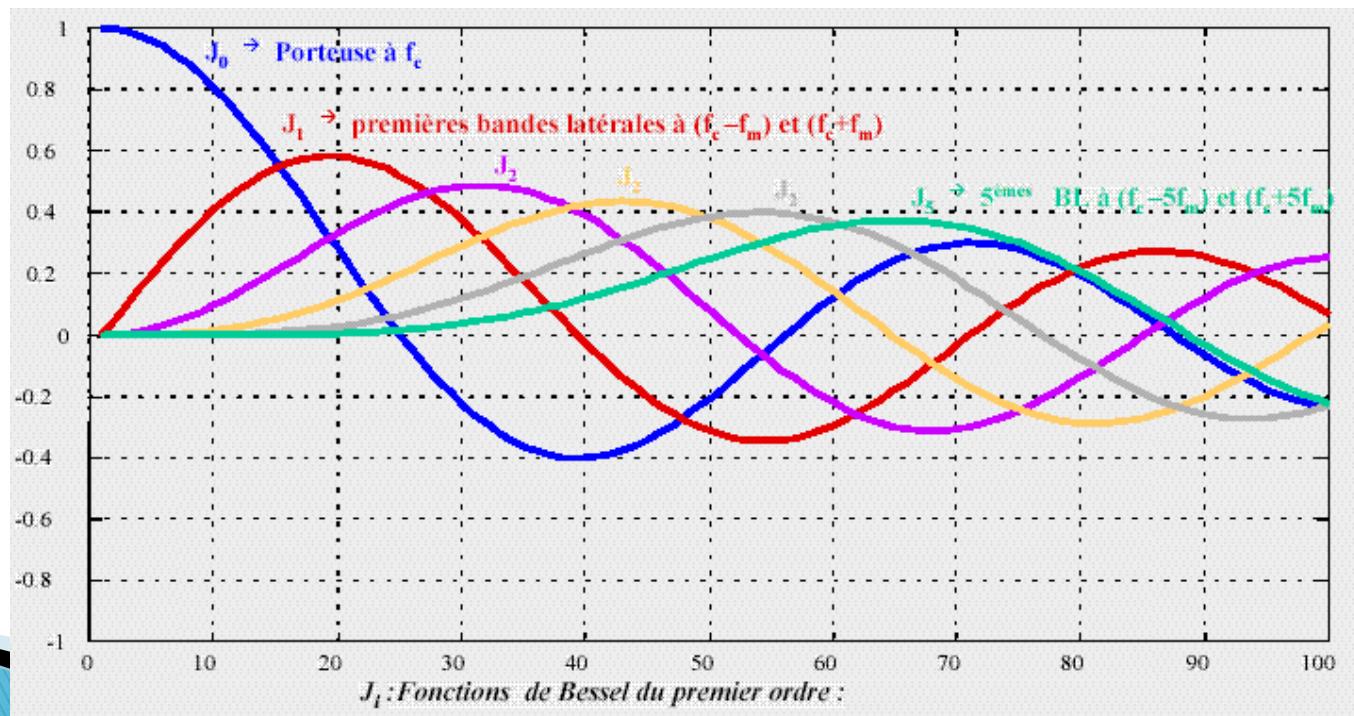
$$J_n(m) = \left(\frac{m}{2}\right)^n \sum_0^{\infty} \frac{(-1)^j \left(\frac{m}{2}\right)^{2j}}{j!(n+j)!}$$



Fonctions de Bessel de première espèce

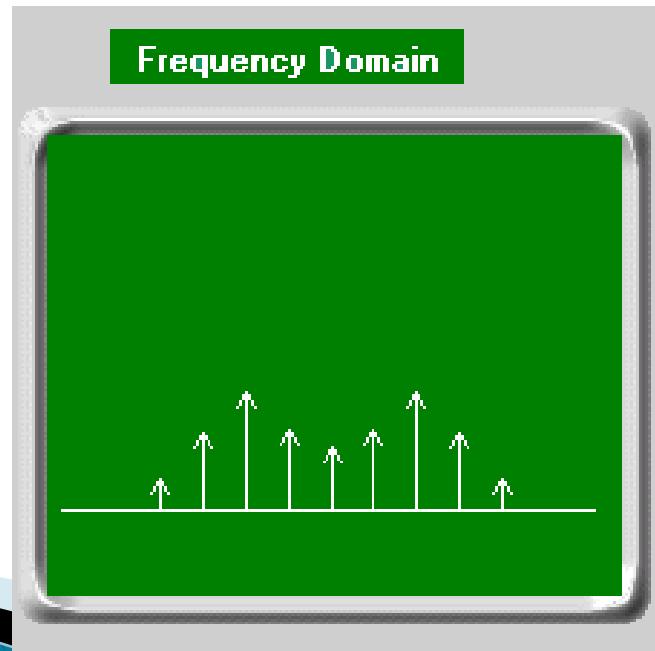
$J_0(0) = 1$ and $J_n(0) = 0$ (pas de modulation).

- lorsque la profondeur de modulation augmente, la puissance du signal modulé se répartit sur les composantes latérales au détriment de la porteuse.



Spectre

- ▶ *Elle fait apparaître :* $s(t) = A \sum_{n=-\infty}^{+\infty} J_n(\beta) \cos(2\pi(f_c + nf_m)t)$
- ▶ *la porteuse de fréquence f_c et d'amplitude $|J_0(\beta)|$.*
- ▶ *Une infinité de composantes latérales de fréquences $f_c \pm nf_m$ et d'amplitude $J_n(\beta)$.*



Règle de Carson

- ▶ En principe, le spectre est infini.
- ▶ On montre que 98 % de la puissance du signal est transmise dans la bande

$$[f_c - (\beta + 1)f_m; f_c + (\beta + 1)f_m].$$

- ▶ Règle de Carson.

La transmission du signal nécessite une plage de fréquence de largeur

$$B = 2(\beta + 1)f_m = 2(\Delta f + f_m) \text{ (*bande de Carson*)}.$$

PM versus FM

Signal Modulant

$$S_m(t) = A_m \cos(2\pi f_m t)$$

Porteuse

$$S_c(t) = A_c \cos(2\pi f_c t)$$

▶ Modulation de phase

- ▶ $\varphi(t) = k_\varphi S_m(t).$
- Signal modulé

$$S_\varphi(t) = A_c \cos[2\pi f_c t + k_\varphi A_m \cos(2\pi f_m t)]$$

$$\beta_\varphi = k_\varphi A_m.$$

$$B_{c_\varphi} = 2(\beta_\varphi + 1)f_m \approx 2 k_\varphi A_m f_m.$$

- La bande dépend de la fréquence du signal modulant

▶ Modulation de fréquence

- The index modulation is

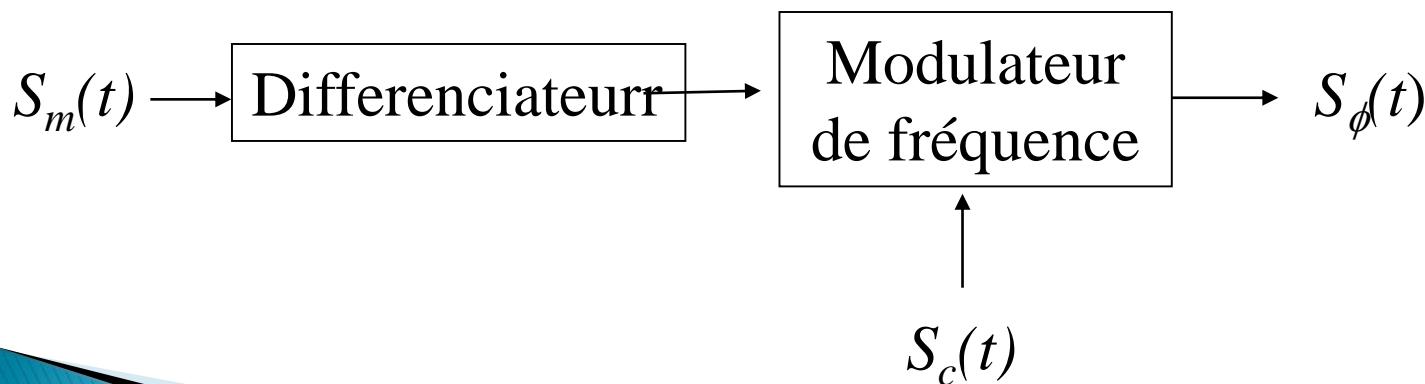
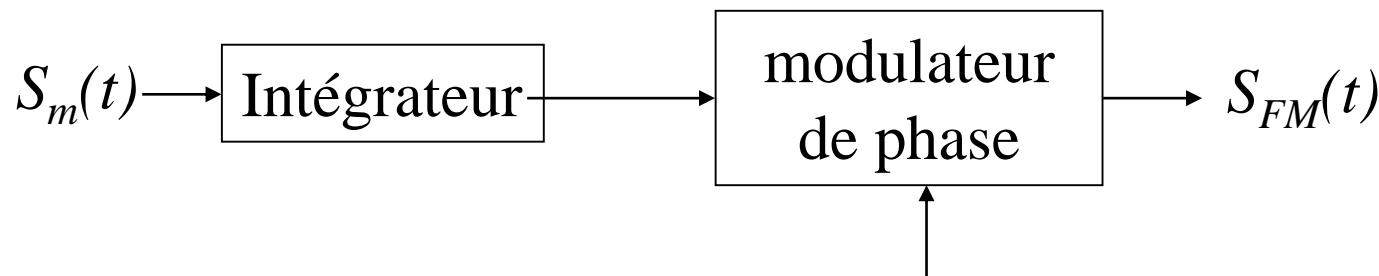
$$\beta_{FM} = \frac{k_{FM} A_m}{2\pi f_m}$$

- Occupation du spectre

$$B_{c_{FM}} = \frac{k_{FM} A_m}{\pi}$$

- La bande est indépendante de la fréquence du signal modulant

PM versus FM



Exercice

- ▶ Un signal sinusoïdal d'amplitude A et de fréquence $f_m = 1 \text{ kHz}$ module en fréquence une porteuse de fréquence $f_c = 10 \text{ MHz}$.
 1. En faisant croître A de 0 à 10 mV , on constate que, pour cette dernière valeur, la raie spectrale située à 10 MHz s'annule pour la première fois. En déduire la sensibilité k du modulateur employé.
 2. On fixe maintenant $A = 50 \text{ mV}$, en déduire β et B_c .

Exercice

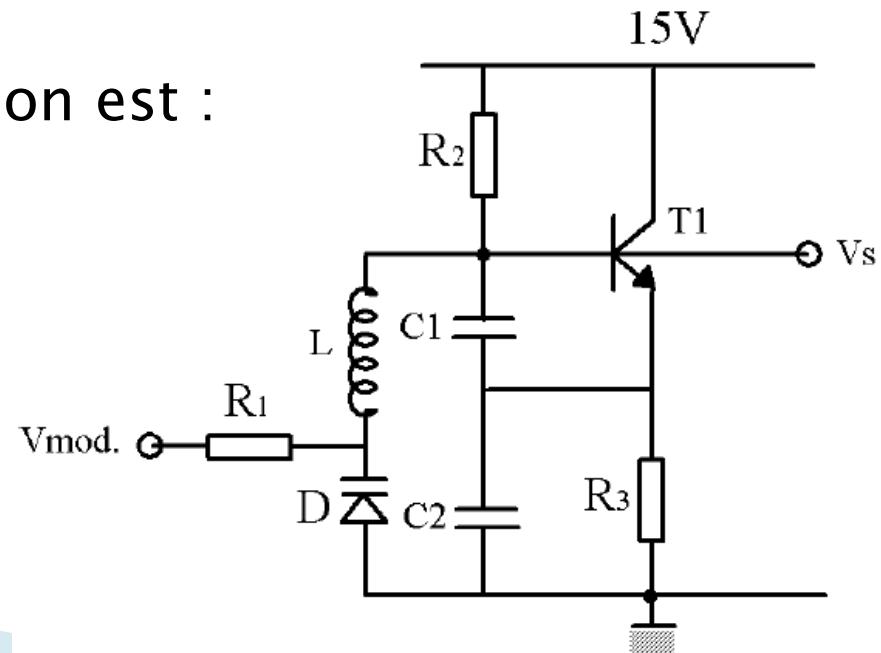
- ▶ Soit $S_{FM}(t) = A\cos(2\pi f_c t + 4\sin(2\pi f_m t))$ avec $f_c \gg f_m$.
 1. Dessiner le spectre de ce signal en se limitant à la règle de Carson. Calculer, en fonction de A, la puissance relative à ce spectre restreint.
 2. Quel est le nombre de paires de raies à considérer afin d'obtenir 80% de la puissance totale de $S_{FM}(t)$?

FM Modulation

▶ Modulation – Oscillateur commandé en tension (VCO)

- réalisé par exemple à partir d'un oscillateur de type Colpitts
- La diode D est une diode varicap qui présente une capacité variable en fonction de la tension inverse appliquée.
- La fréquence d'oscillation est :

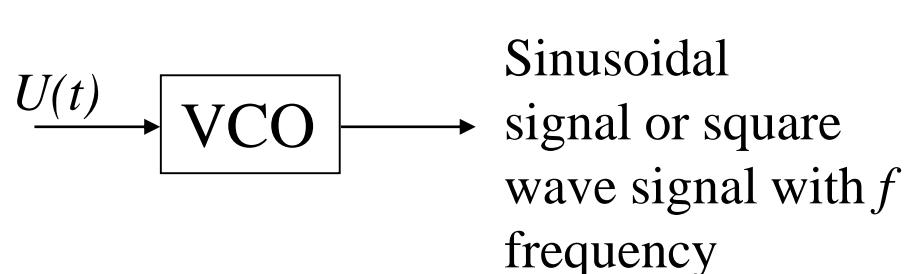
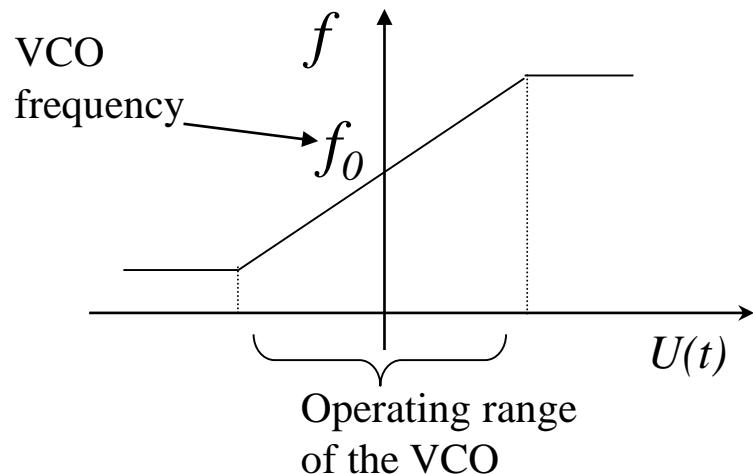
$$f_c = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{1}{\sqrt{LC}}$$



FM Modulation

▶ VCO – Oscillateur commandé en tension

- C'est un composant qui délivre un signal modulé en fréquence en réponse à une commande en tension $U(t)$



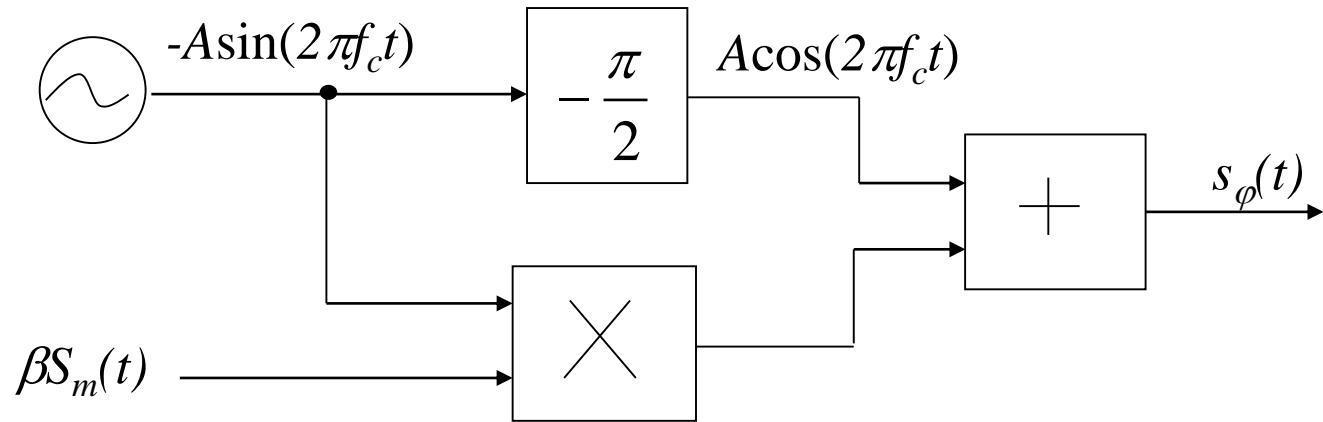
Sinusoidal
signal or square
wave signal with f
frequency

Méthode d'Armstrong

▶ Modulateur de Phase

$$s_\phi(t) = A \cos[2\pi f_c t + \beta S_m(t)]$$

$$\text{if } \beta S_m(t) \ll 1, \quad s_\phi(t) \approx A \cos(2\pi f_c t) - \beta S_m(t) A \sin(2\pi f_c t)$$

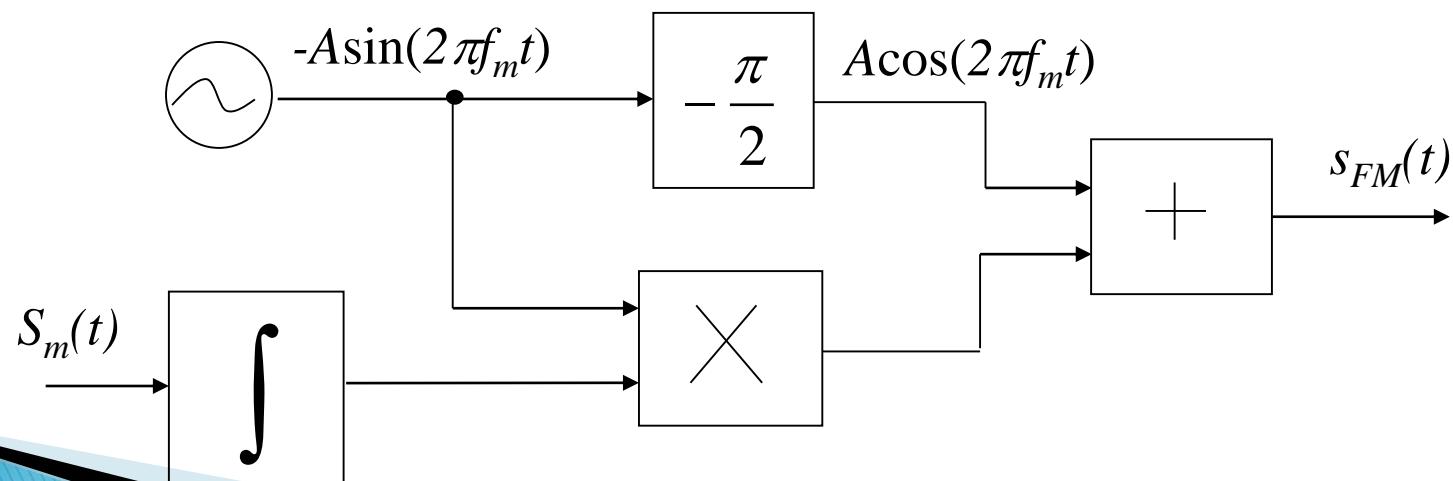


Méthode d'Armstrong

▶ Modulateur en fréquence

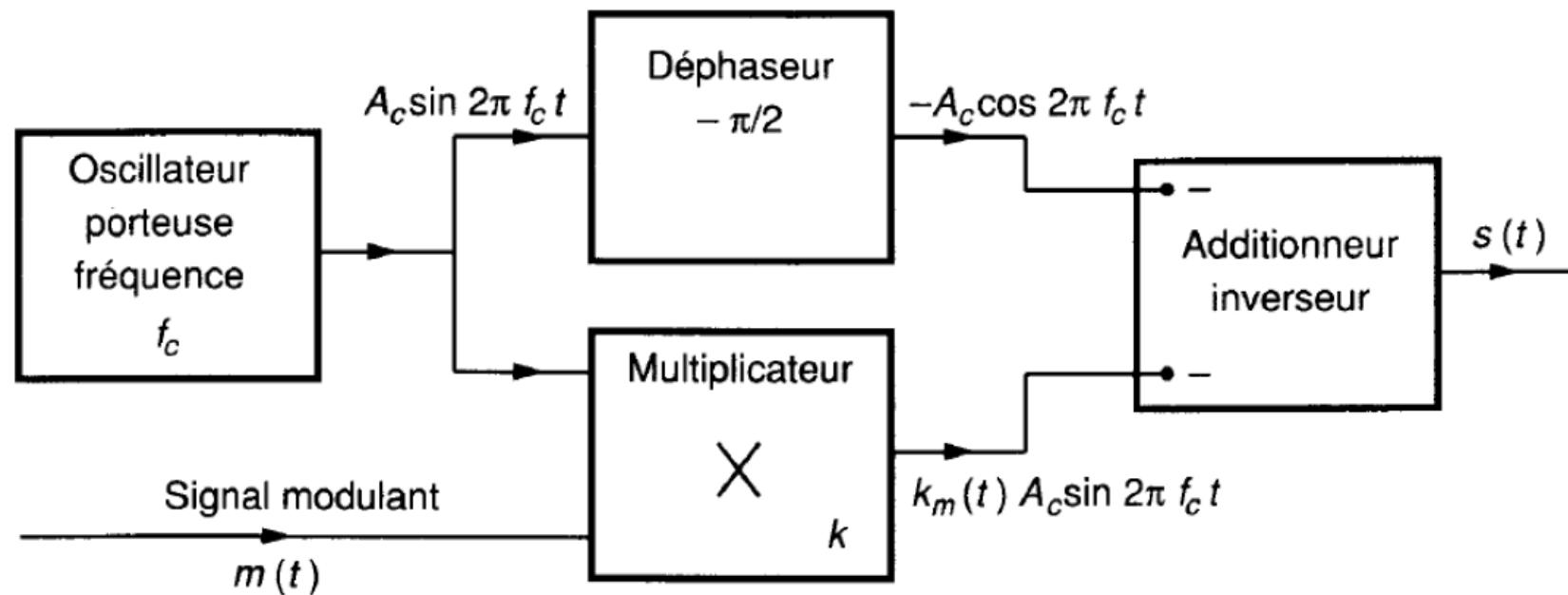
$$s_{FM}(t) = A \cos \left[2\pi f_c t + 2\pi \Delta f \int_0^t S_m(\tau) d\tau \right]$$

if $2\pi \Delta f \int_0^t S_m(\tau) d\tau \ll 1$,



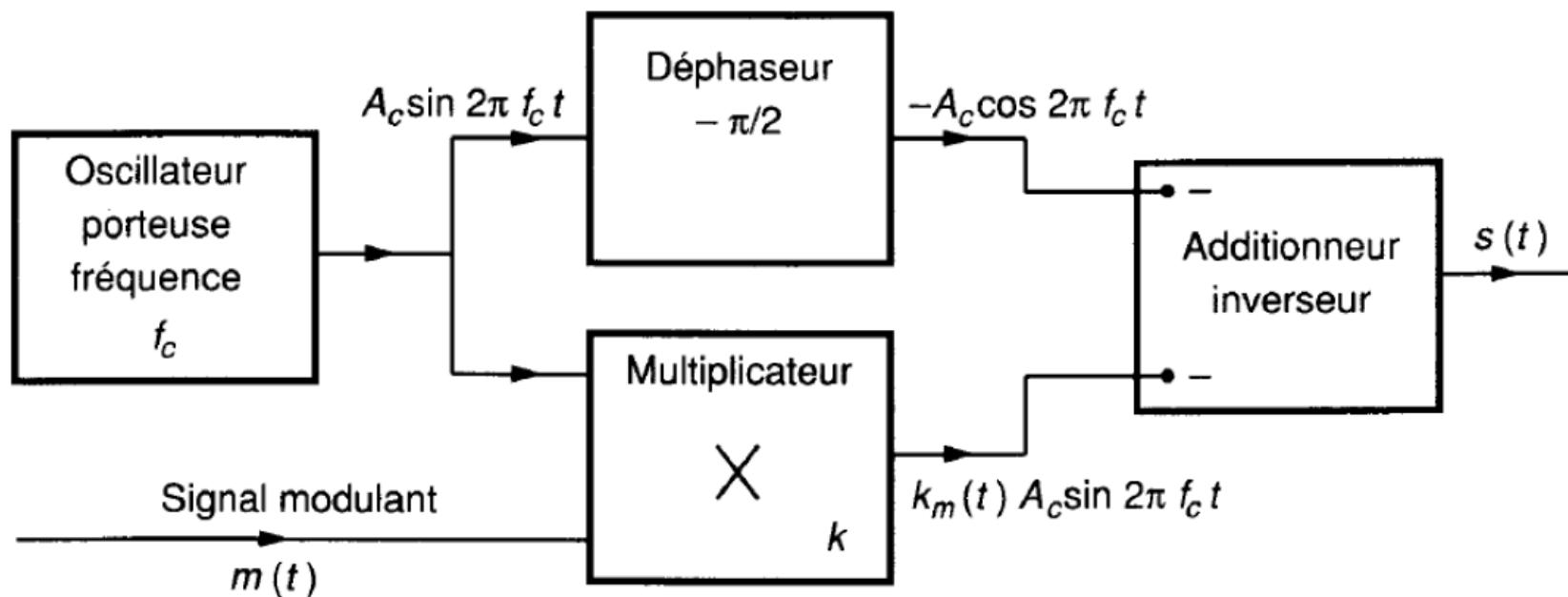
Exercice

- Les méthodes qui consistent à faire varier la fréquence d'un oscillateur au rythme du signal modulant présentent l'inconvénient de ne pas pouvoir fixer avec précision la fréquence de la porteuse, car on ne peut demander au système de posséder une fréquence variable tout en maintenant la fréquence de repos parfaitement stable.



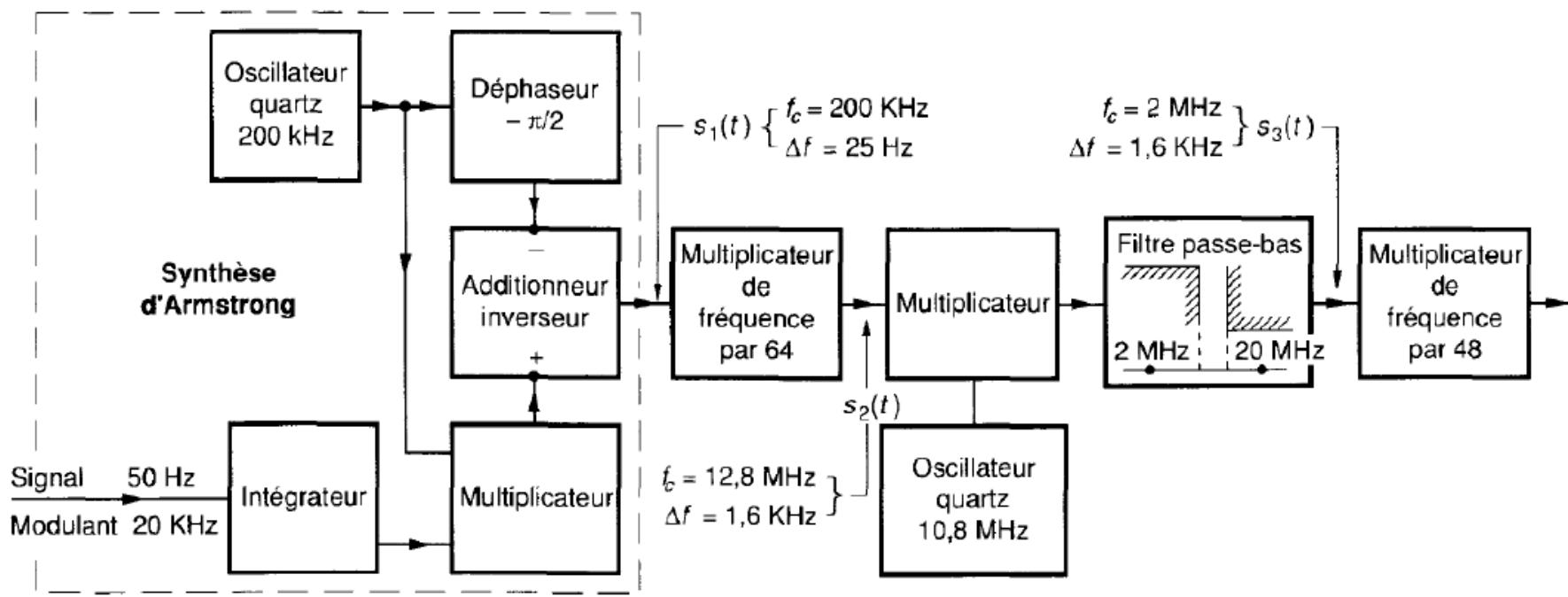
Exercice

- ▶ Soit $s(t)$ le signal modulé en phase par le signal modulant $S_m(t)$
1. Rappeler l'expression du signal $s_\varphi(t)$ en fonction de $S_m(t)$ et montrer que, Pour une faible profondeur de modulation ($k \cdot S_m(t) \ll 1$)
 2. Que faut-il changer au montage pour produire un signal FM ?

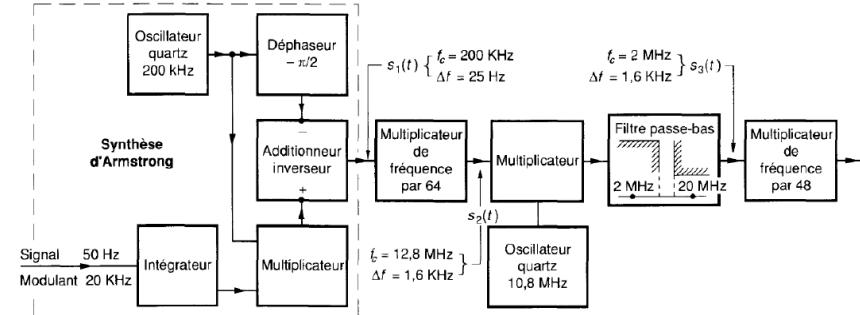


Exercice

- On désire transmettre un signal modulant dont la fréquence f_m varie entre 50 Hz et 20 kHz, à l'aide d'un émetteur F.M. dont la porteuse a pour fréquence $f_c = 96 \text{ MHz}$ et qui encombre toute la plage de fréquence autorisée ce qui correspond à une déviation maximale de fréquence.



Exercice



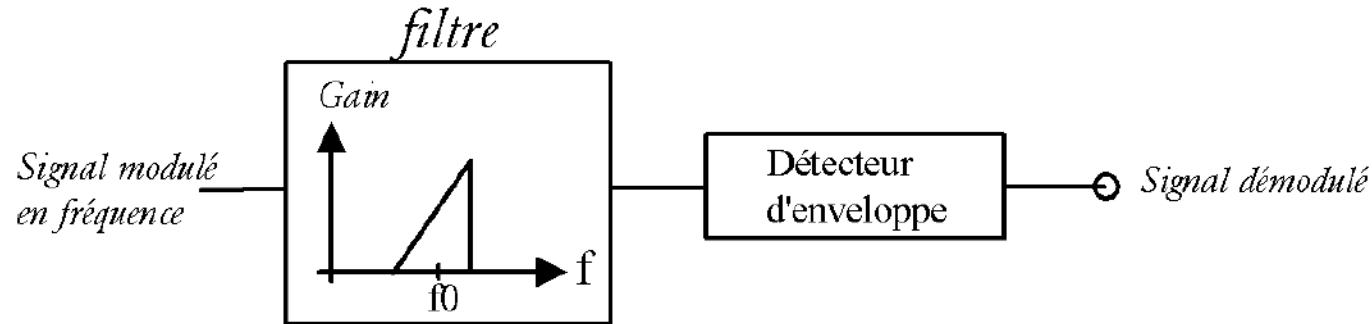
1. Calculer l'indice de modulation et préciser si la condition requise pour réaliser la synthèse d'Armstrong ($\beta \ll 1$) est satisfaite.

Le synthétiseur d'Armstrong fournit un signal F.M. $S_1(t)$ dont la porteuse a pour fréquence $f_c = 200 \text{ kHz}$ et dont la déviation maximale de fréquence Δf , indépendante de la fréquence f_m , est égale à 25 Hz.

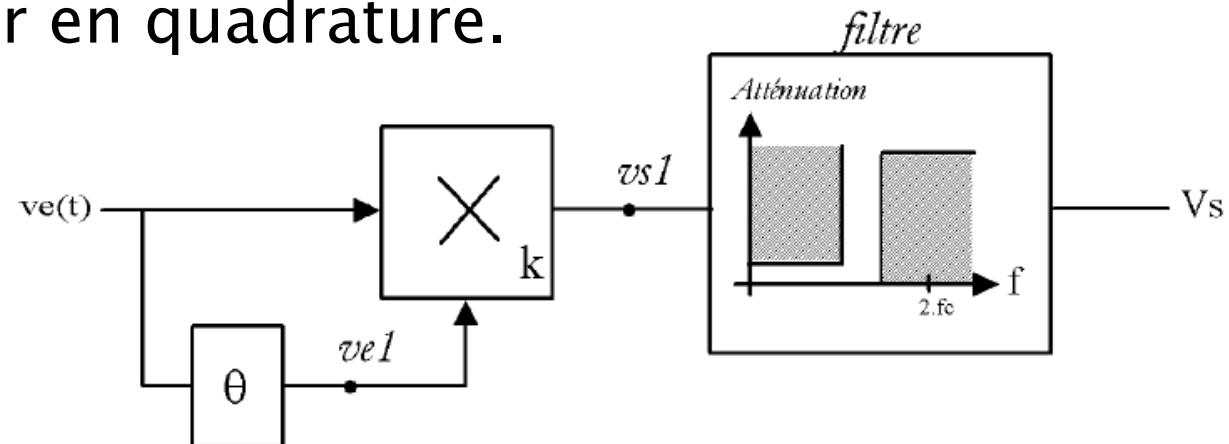
2. Vérifier que les conditions d'utilisation du modulateur d'Armstrong sont vérifiées.
3. Après multiplication de la fréquence par 64, on obtient un signal $s_2(t)$. Donner ses caractéristiques.
4. La multiplication du signal $s_2(t)$ par le signal de fréquence $f_c = 10,8 \text{ MHz}$ fourni par l'oscillateur à quartz conduit à deux bandes fréquentielles. Quelles sont-elles ?
5. Quelles sont les caractéristiques fréquentielles du signal $s_3(t)$ à la sortie du passe-bas ?
6. Après multiplication de la fréquence par 48, montrer que l'on obtient un signal dont la fréquence varie entre 95,923 2 MHz et 96,076 8 MHz ce qui correspond à une porteuse de fréquence $f_c = 96 \text{ MHz}$ et à une déviation maximale de fréquence $\Delta f = 76,8 \text{ kHz}$ légèrement supérieure à 75 kHz.

Demodulation

- ▶ Discriminateur : objectif, transformer la FM en AM.
 - Boucle à verrouillage de phase.



- ▶ Modulateur en quadrature.



Plan du cours

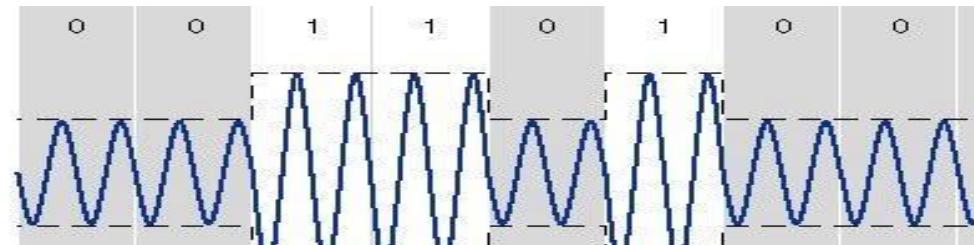
- ▶ Introduction
- ▶ Composantes d'un système de transmission
- ▶ Principe de la modulation
- ▶ Modulations analogiques
 - Modulations d'amplitude
 - modulations de phase et de fréquence
- ▶ **Modulations numériques**
- ▶ Principales architectures d'émission / réception

ASK – Amplitude Shift Keying

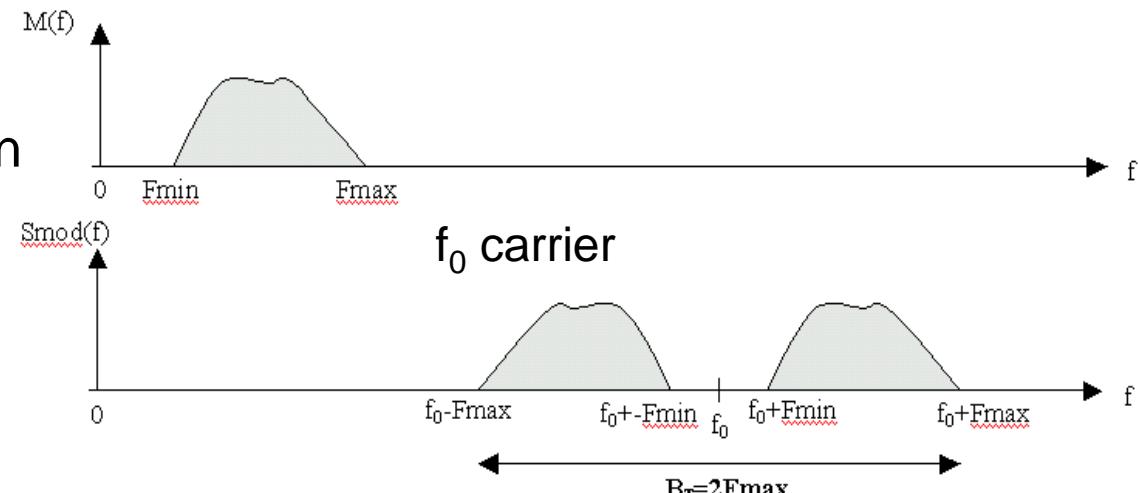
- ▶ 2 amplitudes pour 0 et 1
- ▶ Autre méthode: On Off Keying (OOK)
 - 0 → pas de signal
 - 1 → porteuse

Représentation temporelle

Modulation
(data density: 1 bit)

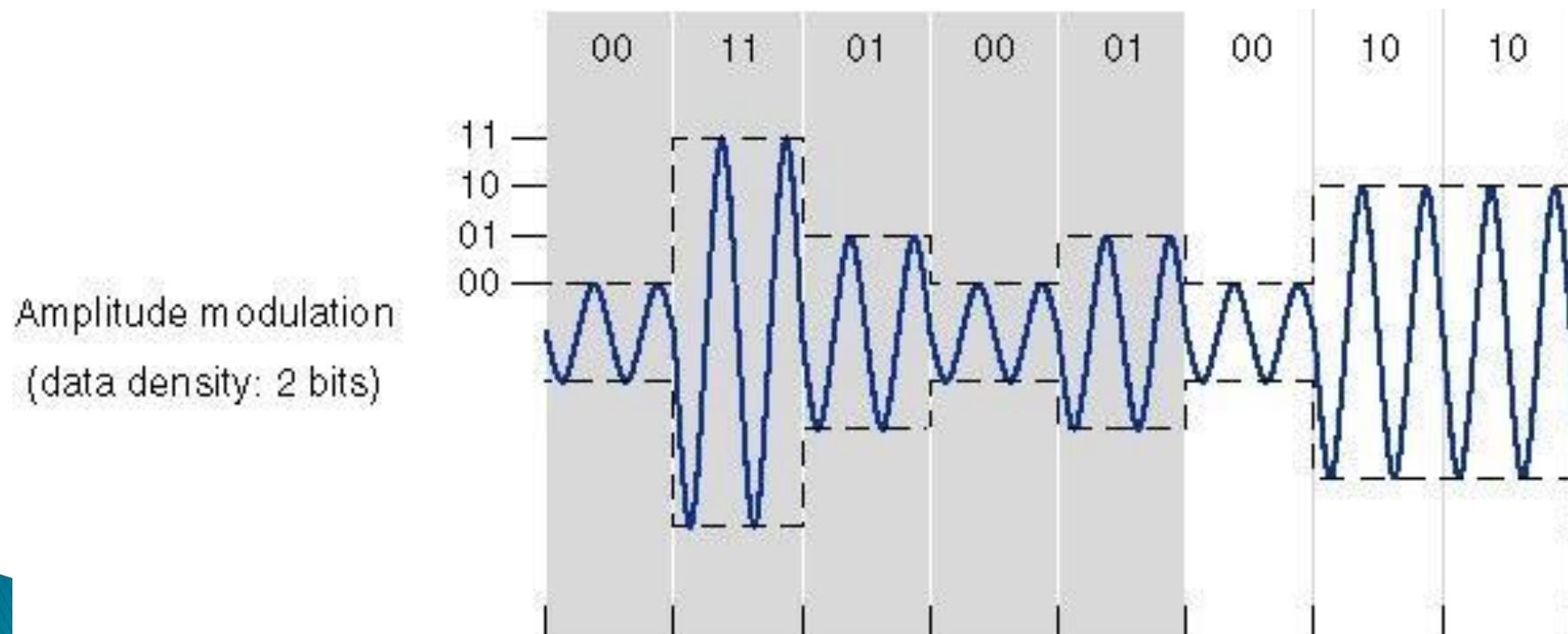


Représentation fréquentielle



ASK – Amplitude Shift Keying

- ▶ Plus efficace: transmettre plusieurs bits en même temps

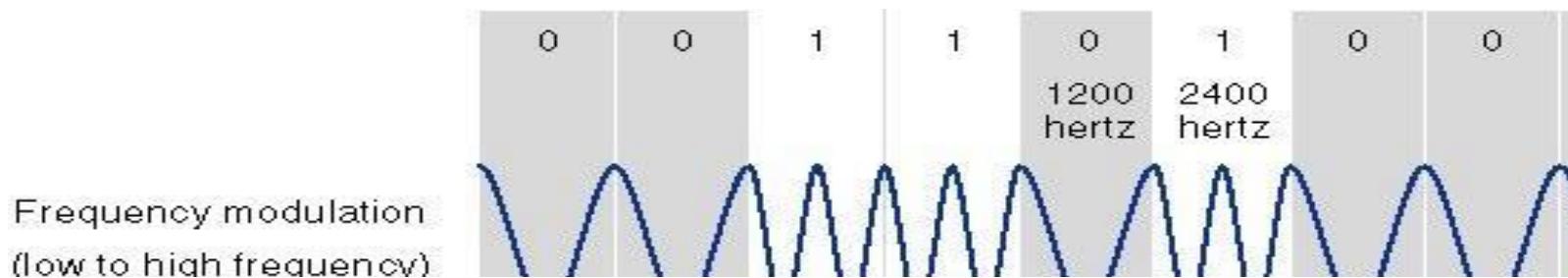


Exercice

- ▶ Nous voulons transmettre les bits suivants:
0111001101.
- ▶ Dessinez :
 - Les bits transmis
 - Le signal ASK
 - Le signal modulé avec une plus grande efficacité (factor 2)

Frequency Shift Keying – FSK

- ▶ 1 -> f_1 porteuse
- ▶ 0 -> f_2 porteuse



Frequency Shift Keying – FSK

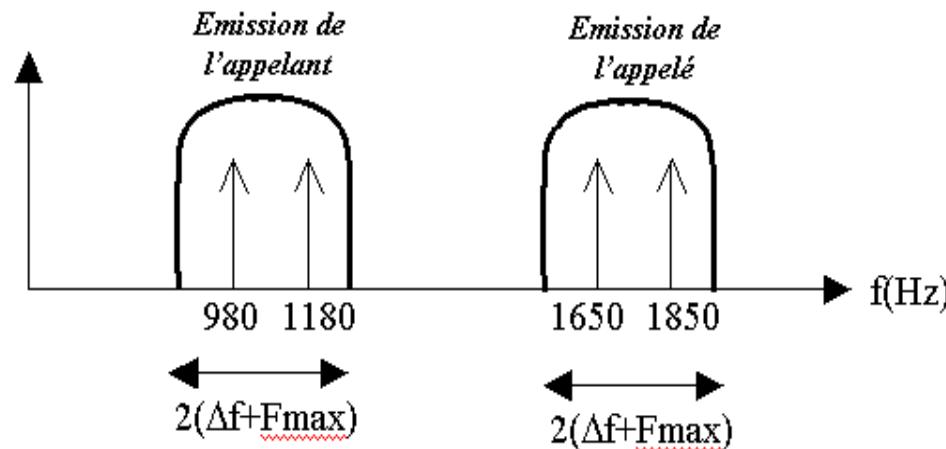
► Exemple

canal 1 :

- « 1 » → $f_1 = 980\text{Hz}$
- « 0 » → $f_2 = 1180\text{Hz}$

canal 2 :

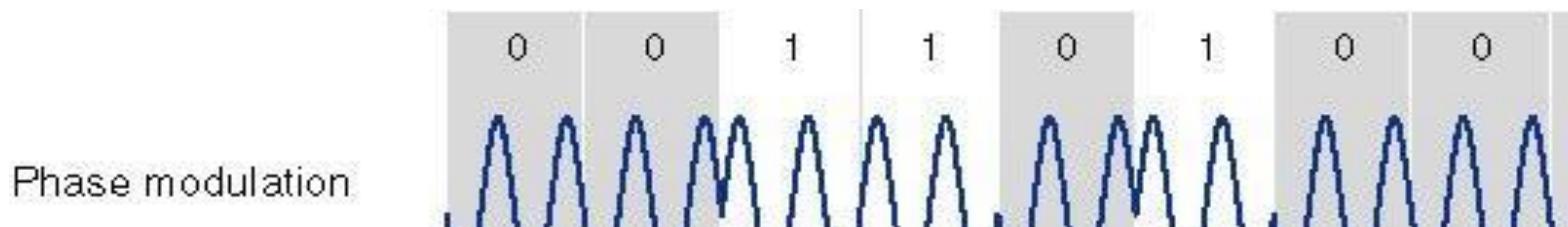
- « 1 » → $f_1 = 1650\text{Hz}$
- « 0 » → $f_2 = 1850\text{Hz}$



- + résistant au bruit
- - grande bande passante

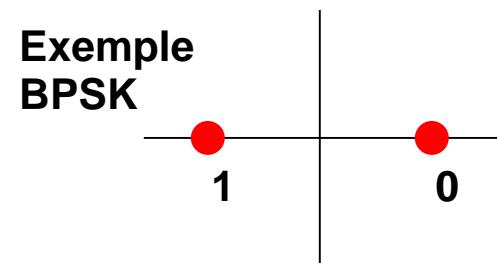
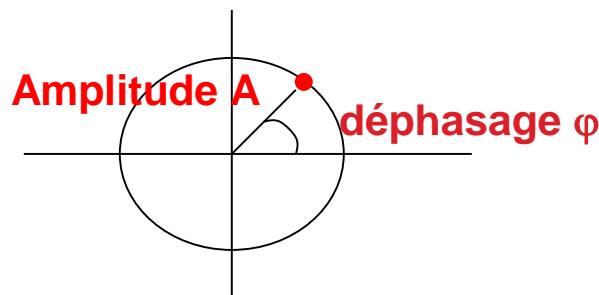
Phase Shift Keying - PSK

- ▶ $1 \rightarrow \varphi_1$
- ▶ $0 \rightarrow \varphi_2$
- ▶ Exemple: BPSK – PSK avec 2 états ou niveaux
 - $0 \rightarrow$ en phase avec la porteuse
 - $1 \rightarrow$ déphasage de 180°



Phase Shift Keying - PSK

- ▶ 1 $\rightarrow \varphi_1$
- ▶ 0 $\rightarrow \varphi_2$
- ▶ Exemple: BPSK – PSK with 2 states or levels
 - 0 \rightarrow en phase avec la porteuse
 - 1 \rightarrow déphasage de 180°

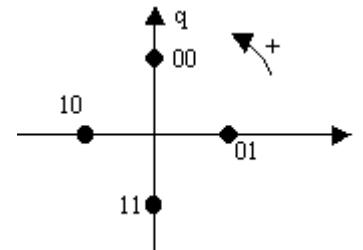


Graphique trigonométrique ou **constellation**

Phase Shift Keying - PSK

► 4-PSK

Information	phase
01	0
00	90
10	180
11	270



Constellation

- À chaque point de la constellation, on associe un mot binaire de 2 bits.

Phase Shift Keying - PSK

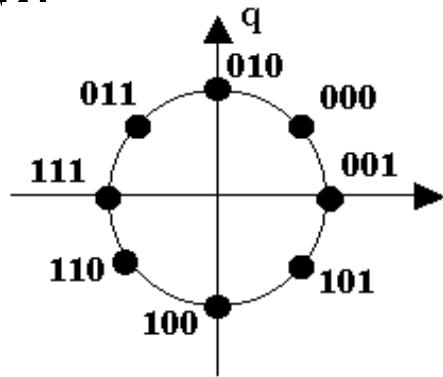
- ▶ DPSK (Differential Phase Shift Keying)
 - La phase change par rapport à l'état précédent.
 - Bonne synchronization entre émetteur et récepteur
=> envoi périodique de séquences de 1 et 0

Exercice

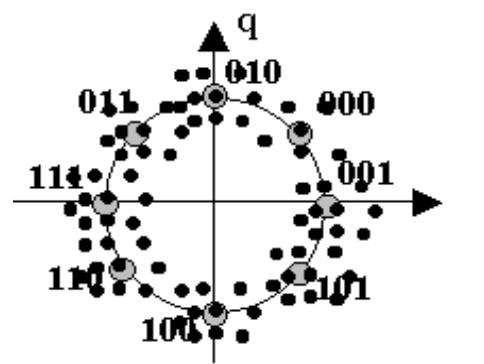
- ▶ Nous voulons transmettre les bits suivants:
0111001101.
- ▶ Dessinez :
 - Les bits transmis
 - Le signal avec une modulation BPSK
 - Le signal modulé avec une plus grande efficacité (factor 2)
 - Le signal avec une modulation différentielle BPSK
 - Les constellations correspondantes

Vitesse de modulation

- ▶ La vitesse de transmission des données augmente avec le nombre d'états.
- ▶ Influence du bruit=> plus grande probabilité d'erreur



Sans bruit

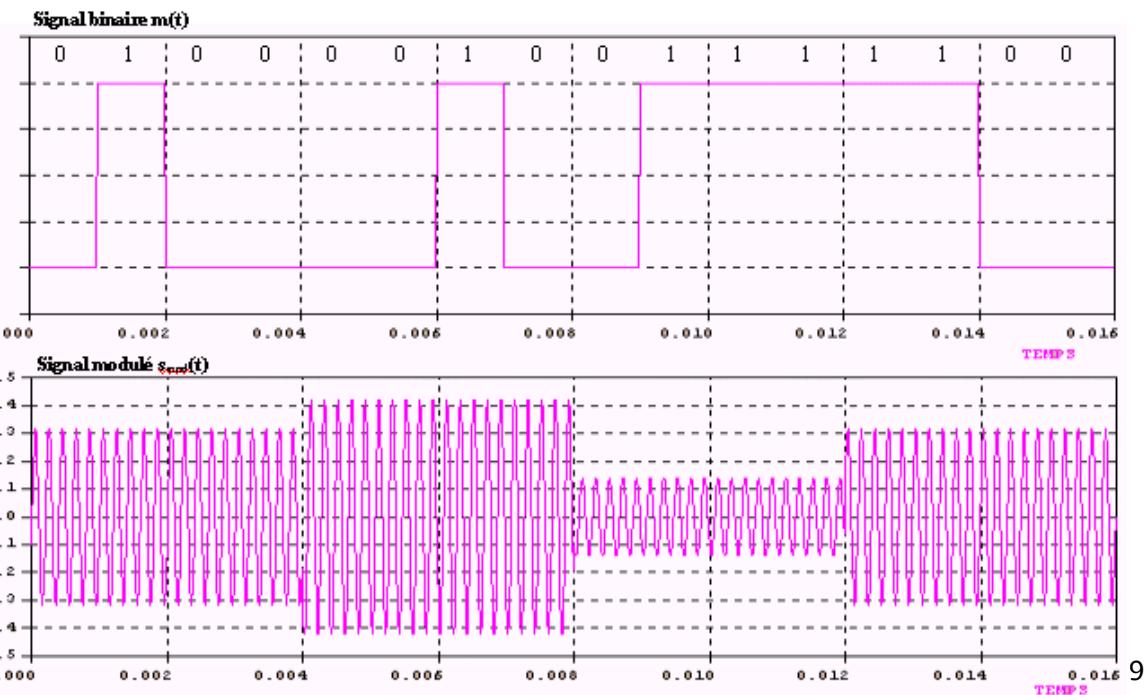
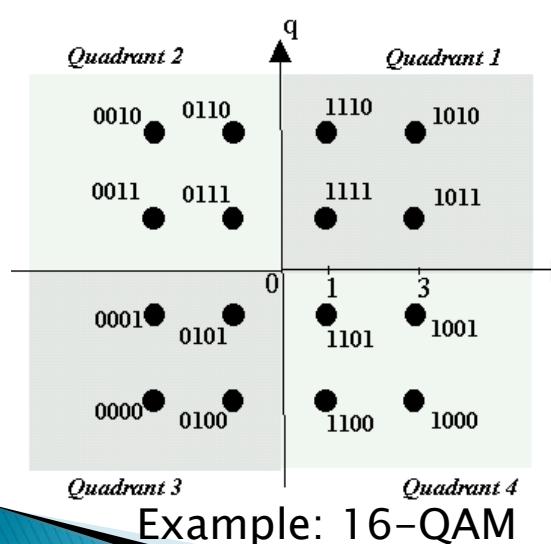


Avec bruit

- ▶ Rapidité de modulation en Baud: symbols émis/seconde
- ▶ Taux binaire : bits émis/seconde

Autres modulations

- ▶ Combinaison de modulations d'amplitude et de phase
 $\text{QAM}-M = M$ états différents en phase et amplitude.
- ▶ En général, $M = 2^n$: chaque symbole donne un code pour $n = \log_2(M)$ bits.



Exercice

- ▶ Nous voulons transmettre les bits suivants:
0111001101.
- ▶ Dessinez :
 - Les bits transmis
 - Le signal avec une modulation OOK
 - Le signal avec une modulation différentielle BPSK
 - Le signal avec une modulation différentielle 4–PSK
 - Les constellations correspondantes

Exercice

- ▶ Dessinez la constellation pour une modulation QAM-8

Information	Amplitude	Phase
000	1	0
001	2	0
010	1	90
011	2	90
100	1	180
101	2	180
110	1	270
111	2	270

Applications des modulations numériques

Modulation format	Application
MSK, GMSK	GSM, CDPD
BPSK	Deep space telemetry, cable modems
QPSK, $\pi/4$ DQPSK	Satellite, CDMA, NADC, TETRA, PHS, PDC, LMDS, DVB-S, cable (return path), cable modems, TFTS
OQPSK	CDMA, satellite
FSK, GFSK	DECT, paging, RAM mobile data, AMPS, CT2, ERMES, land mobile, public safety
8, 16 VSB	North American digital TV (ATV), broadcast, cable
8PSK	Satellite, aircraft, telemetry pilots for monitoring broadband video systems
16 QAM	Microwave digital radio, modems, DVB-C, DVB-T
32 QAM	Terrestrial microwave, DVB-T
64 QAM	DVB-C, modems, broadband set top boxes, MMDS
256 QAM	Modems, DVB-C (Europe), Digital Video (US)

Applications des modulations numériques

Modulation format	Theoretical bandwidth efficiency limits
MSK	1 bit/second/Hz
BPSK	1 bit/second/Hz
QPSK	2 bits/second/Hz
8PSK	3 bits/second/Hz
16 QAM	4 bits/second/Hz
32 QAM	5 bits/second/Hz
64 QAM	6 bits/second/Hz
256 QAM	8 bits/second/Hz